



Etude de la canopée forestière : De la mesure lidar aéroportée à l'observation spatiale

Xiaoxia Shang

► To cite this version:

Xiaoxia Shang. Etude de la canopée forestière : De la mesure lidar aéroportée à l'observation spatiale. Sciences de la Terre. Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, 2014. Français. NNT : 2014VERS0059 . tel-01227830

HAL Id: tel-01227830

<https://theses.hal.science/tel-01227830>

Submitted on 12 Nov 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITE DE VERSAILLES SAINT-QUENTIN-EN-YVELINES

Spécialité

Météorologie, océanographie physique de l'environnement
(Ecole Doctorale des Sciences de l'Environnement d'Ile-de-France – SEIF)

Présentée par

SHANG Xiaoxia

Pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines

**Etude de la canopée forestière :
De la mesure lidar aéroporté à l'observation spatiale**

Soutenue le 16/12/2014, Devant le jury composé de :

Pr. Patrick RAIROUX	Rapporteur	Professeur de l'Université de Lyon-1
Dr. Nicolas BAGHDADI	Rapporteur	Directeur de recherche à l'Irstea
Pr. Gérard CAUDAL	Examineur	Professeur de l'UVSQ
Dr. Marie-Rose LEFEVRE-FONOLLOSA	Examineur	Docteur d'état, Ingénieur CNES
Dr Cyril FLAMANT	Examineur	Directeur de recherche au CNRS
M. Fransesc TINTO	Invité	Ingénieur CNES
Dr. Patrick CHAZETTE	Directeur de thèse	Ingénieur-Chercheur du CEA

Thèse préparée au sein du
Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

Financée par le **Centre National d'Etude Spatiales** et la **Direction générale de l'Armement**,
sous la coordination du **Commissariat à l'Energie Atomique et aux énergies alternatives**

REMERCIEMENT

Ce travail a été réalisé au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, dirigé successivement par Cyril Moulin et Elsa Cortijo. Ma thèse est cofinancée par le CNES et la DGA.

Je tiens tout d'abord à remercier les personnes qui m'ont fait l'honneur de participer à mon jury de thèse : Patrick Rairoux, Nicolas Baghdadi, Gérard Caudal, Cyrille Flamant, Marie-Rose Lefevre-Fonollosa et Fransesc Tinto. Merci pour le temps consacré à la lecture de mon manuscrit et pour l'attention portée lors de ma soutenance.

Mes remerciements les plus vifs vont à Patrick Chazette qui a dirigé ces activités de recherche. Avec un intérêt constant porté à mon travail, une écoute et une disponibilité inconditionnelle, il a su efficacement guider cette thèse, me donner confiance en moi et m'intéresser au travail expérimental qu'il affectionne tant. Il m'a appris beaucoup de choses sur les méthodes de travaux et sur la vie.

Un grand merci à mes collègues de l'équipe lidar : Julien Totems, Elsa Dieudonné, Fabien Marnas, François Dulac, Eric Hamonou et Joseph Sanak. J'ai passé mes trois ans de thèse avec vous au labo (repas, resto, café), mais également, j'ai partagé une vie très sympathique avec vous durant les expériences de terrain (OHP, Aubenas, Minorca, et la Réunion).

J'ai réalisé cette thèse en compagnie de Robin Locatelli et Rihab Mechri en thèse au LSCE, merci pour tous ces moments partagés. Merci aussi à la « Communauté chinoise » du LSCE : Peng Shushi, Yin Yi, Lin Xin, Chang Jinfeng, Wang Tao, etc., vos présences, amitiés et rires m'ont été indispensables.

J'ai également eu le plaisir de collaborer avec Cyrille Flament et Jean-Christophe Raut du LATMOS, Valentin Duflot et Pierre Tulet du LACY, Dominique Strasberg, Olivier Flores et Jacques Fournel à l'Université de la Réunion.

Je tiens enfin à remercier mes parents et mes amis. Et en particulier mes amis de 10 ans, Lu Shuxian, Zheng Yuling, Gong Li, Wang Jin, Cai Li et Li Chuan, pour m'avoir soutenu, et pour vos présences dans ma vie tout au long de ces 6 ans en France.

RESUME

Etude de la canopée forestière : De la mesure lidar aéroporté à l'observation spatiale

Le travail de recherche présenté dans cette thèse a pour objectif principal l'évaluation de l'intérêt de la télédétection active par lidar, à partir de plateformes spatiales, pour le suivi des systèmes forestiers à l'échelle de la planète. La forêt est l'un des principaux modérateurs du climat par son action sur les grands cycles biogéochimiques dont les plus importants sont les cycles de l'eau et du gaz carbonique. Cet environnement est néanmoins très mal documenté à l'échelle globale car il n'est pas toujours facile d'accès. Les observations aéroportées et spatiales, par télédétection, sont donc les approches les mieux adaptées afin de donner accès aux différentes échelles caractéristiques des processus d'interaction entre le milieu atmosphérique et la forêt. Afin de valoriser la télédétection par lidar, il a été nécessaire de construire une base de données représentative de différents environnements forestiers, allant de la forêt gérée à la forêt tropicale primaire. Ces données ont été obtenues suite à plusieurs campagnes utilisant un nouveau démonstrateur lidar, le système ULICE (Ultraviolet LIdar for Canopy Experiment). Elles ont permis d'évaluer les différentes sources d'incertitudes liées à la mesure pour l'extraction des paramètres forestiers pertinents (i.e. hauteur des arbres, quantité de biomasse aérienne, indice de couverture foliaire, ...). Cette évaluation a été possible suite au développement d'un simulateur numérique qui prend en compte les caractéristiques de la surface, de l'atmosphère, de l'instrumentation lidar et d'orbitographie du satellite. On montre que la télédétection active lidar est une méthode de mesure performante pour la caractérisation des forêts à partir d'observations aéroportées ; elle reste très attractive pour des systèmes spatiaux en orbite basse, entre 300 et 500 km, comme la station spatiale internationale.

Mots-clés : lidar canopée, satellite, aéroporté, forêt, propriétés optiques, propriétés structurales, incertitude.

ABSTRACT

Forest canopy study: From airborne to spaceborne lidar observations

The research presented in this thesis aims at evaluating the usage of active remote sensor lidar, from space platforms to monitor forest systems at a global scale. Forest is one of the main climate regulators through biogeochemical cycles, in which the most important processes are water cycle and carbon cycle. However, it is still poorly documented at a global scale because it is not always easy to get the information. Airborne and spaceborne observations, through remote sensing, are therefore the most suitable approaches to characterize the interactions between forest and atmosphere, at a regional or global scale. In order to improve the lidar remote sensing, it was necessary to build a representative database of different forest types, from managed forest to primary tropical forest. These data are obtained from several experiments using a new airborne demonstrator, the ULICE (Ultraviolet Lidar for Canopy Experiment). These data allows us to evaluate different uncertainty sources associated with the measurements for the extraction of corresponding forest parameters (i.e. tree height, aboveground biomass, leaf area index, etc.). This evaluation is based on the development of a numerical simulator which takes into account the surface characteristics, the atmosphere, the lidar instrumentation, and the satellite orbitography. We show that the active remote sensing sensor lidar is a powerful measuring method to characterize the forest from airborne observations; it remains very promising for spaceborne systems in low orbit, between 300 and 500 km, as the International Space Station.

Keywords: canopy lidar, satellite, airborne, forest, optical properties, structural properties, uncertainty.

LISTE DES VARIABLES

variables	Unité	Description
A	m^2	surface du récepteur (téléscope)
AGC	$\text{tC} \cdot \text{ha}^{-1}$	« Aboveground carbon » en anglais
a_i	*	amplitude du chaque $i^{\text{ème}}$ onde gaussien
BER	sr^{-1}	rapport des coefficients de rétrodiffusion et d'extinction, « Backscatter-to-Extinction Ratio » en anglais
c	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	célérité de la lumière ($\sim 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),
CH	m	« Canopy height » en anglais
CHP	m^{-1}	« canopy height profile » en anglais
$CCHP$	*	« cumulative canopy height profile » en Anglais
D	m	distance entre deux empreintes laser (tirs lidar) consécutifs
E_0	J	énergie d'émission du laser
FOT	*	épaisseur optique de la forêt, « forest optical thickness » en anglais
G	$\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$	gain du système (y compris les gains de l'étage de pré-amplification et des photomultiplicateurs)
\hbar	$\text{J} \cdot \text{s}$	constante de Planck ($\sim 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)
h	m	Une altitude
h_t	m	altitude du sommet de la couche de diffusion
$HTTH$	m	« Highest Tree Top Height » en anglais
IS	$\text{V} \cdot \text{m}$	signal intégré, « Integrated Signal » en anglais
K	$\text{V} \cdot \text{km}^3$ ou $\text{photons} \cdot \text{km}^3$	constante instrumentale
k_B	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$	constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)
L	m	distance entre 2 traces au sol du lidar
LAI	m^2/m^2	Leaf Area Index
m_i	*	position du chaque $i^{\text{ème}}$ onde gaussien
$NDVI$	*	« Normalized Difference Vegetation Index » en anglais
NEP	$\text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$	puissance équivalente de bruit du détecteur
OD	*	Densité optique
OE	*	rendements optique

QE	*	rendements quantique
$QMCH$	m	« quadratic mean canopy height » en Anglais
R	m	rayon de l’empreinte au sol
R_c	Ω	résistance de charge
S	V ou nombre de photon	Signal lidar
S_{mc}	V ou nombre de photon	Partie de la diffusion multiple du signal lidar
SNR	*	« Signal to Noise Ratio » en anglais
T	*	Transmission
THP	*	« transmittance height profile » en anglais
T_K	K	température du détecteur
TTH	m	« Tree top height » en anglais
Z_p	km	altitude de l’instrument
Δz	m	résolution du lidar le long de la ligne de visée
α	km^{-1}	coefficient d’extinction
$\alpha_{forêt}$	m^{-1}	coefficient d’extinction de la forêt
β	$\text{km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$	coefficient de rétrodiffusion
ζ	*	facteur correctif des photomultiplicateurs
λ	nm	longueur d’onde
σ_i	*	écart type du chaque $i^{ème}$ onde gaussien
σ_D	V	écart-type du bruit d’obscurité
σ_{JN}	V	écart-type du bruit de Nyquist-Johnson
σ_S	V ou nombre de photon	écart-type du bruit de grenaille
η	*	coefficient de la diffusion multiple
Γ	*	épaisseur optique totale entre l’instrument et l’altitude du diffuseur

*: pas d’unité. Les variables utilisées dans les articles ne sont pas inclus.

SOMMAIRE

REMERCIEMENT	3
RÉSUMÉ	5
ABSTRACT	6
LISTE DES VARIABLES	7
SOMMAIRE.....	9
CHAPITRE 1.....	13
1 INTRODUCTION	13
1.1. Contexte scientifique général.....	13
1.1.1. L'évolution de la composition chimique de l'atmosphère	13
1.1.1.1. <i>L'atmosphère et la vie</i>	15
1.1.1.2. <i>Gaz à effet de serre</i>	16
1.1.1.3. <i>Aérosol</i>	17
1.1.1.4. <i>Propriétés photo-oxydantes</i>	18
1.1.2. Contexte économique, social et politique	19
1.1.2.1. <i>L'humain et le changement climatique</i>	19
1.1.2.2. <i>Politiques Environnementales</i>	20
1.2. Cycle du carbone en lien avec le milieu forestier	21
1.2.1. Bilan du carbone	21
1.2.2. Rejet du Carbone	22
1.2.3. Stock du carbone	23
1.2.4. Boucles de rétroaction du cycle du carbone et climat	24
1.3. L'observation des forêts.....	25
1.3.1. L'importance de la forêt.....	26
1.3.2. Etat de l'art.....	27
1.4. Organisation de la thèse	30
1.4.1. Objectifs	30
1.4.2. Plan de la thèse	30
CHAPITRE 2.....	33
2 LIDAR CANOPEE : HISTORIQUE ET NOTIONS THEORIQUES.....	33
2.1. Introduction	33
2.2. L'instrument lidar	34
2.2.1. Définitions du lidar en générale et lidar canopée	34
2.2.2. Lidar pour les applications forestières	35
2.2.3. Du passé vers l'actuel.....	36
2.2.4. Le démonstrateur ULICE	37

2.2.4.1.	Choix de la longueur d'onde	38
2.2.4.2.	Emission.....	39
2.2.4.3.	Réception.....	41
2.2.4.4.	Chaîne d'acquisition	41
2.3.	Théorie.....	42
2.3.1.	Modélisation directe	42
2.3.1.1.	Paramètres instrumentaux.....	42
2.3.1.2.	Propriétés optiques du milieu diffusant.....	43
2.3.1.3.	Sources de bruit	44
2.3.2.	Modélisation inverse.....	45
2.3.2.1.	Algorithme : la méthode du seuillage de l'intensité	45
2.3.2.2.	Algorithme : la méthode gaussienne.....	46
2.3.2.3.	Comparaison entre les 2 algorithmes.....	49
2.3.2.4.	Paramètres forestiers déduit par lidar.....	50
2.4.	Approche: un couplage entre les mesures et une modélisation « end-to-end ».....	53
2.4.1.	Simulateur « end-to-end »	54
2.4.2.	L'approche expérimentale	56
2.4.2.1.	Méthode d'échantillonnage spatial.....	57
2.4.2.2.	Sites forestiers étudiés.....	59
2.5.	Conclusion.....	60
CHAPITRE 3.....		61
3	PARAMETRES FORESTIERS	61
3.1.	Introduction	61
3.2.	Hauteur d'arbre (TTH).....	62
3.2.1.	Forêt des Landes : une première vision des zones forestières en croissance.....	62
3.2.2.	Région de l'Observatoire de Haute Provence (OHP) : Un échantillonnage verticale accru	64
3.2.2.1.	Site de l'OHP – chêne blanc	66
3.2.2.2.	Autres sites forestiers autour de l'OHP.....	68
3.2.3.	Forêt de Fontainebleau : représentative d'une forêt de moyenne-latitude	70
3.2.3.1.	Barbeau – site bien documenté	70
3.2.3.2.	Fontainebleau – à grand échèle	73
3.3.	Hauteur quadratique moyenne (QMCH) – Biomasse	77
3.3.1.	Article: Interest of a Full-Waveform Flown UV Lidar to Derive Forest Vertical Structures and Aboveground Carbon	77
1.	Introduction	79
2.	Instrumental Set-Up and Strategy	80
3.	Theory.....	84
4.	Experimental Results and Uncertainties for Airborne Full-Waveform UV Lidar Measurements	89
5.	Conclusions	98
	Appendix A: Lidar Ground-Track Location (Geolocation).....	100
3.3.2.	Compléments d'étude	105
3.3.2.1.	Utilité des arbres dominants	105
3.3.2.2.	Utilité de la QMCH (hauteur quadratique moyenne)	106

3.4. Epaisseur optique de la forêt (FOT)	107
3.4.1. Leaf Area Index (LAI)	107
3.4.2. De la FOT (épaisseur optique de la forêt) au NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	109
3.5. Conclusion.....	110
CHAPITRE 4.....	113
4 EVALUATION EN FORET TROPICALE.....	113
4.1. Introduction	113
4.2. Article : Tropical forests of Réunion Island observed by airborne lidar	115
1. Introduction	117
2. Experimental set up	118
2.1. Instrumentation	118
2.2. Forest sites	120
3. Lidar data processing	122
3.1. Canopy height estimation	122
3.2. Forest optical parameters	123
3.3. Ecological parameters	124
4. Sampling strategy	125
5. Discussion on retrieved tropical forest ecological parameters	128
5.1. Canopy height	129
5.2. Leaf area index	134
6. Conclusion	137
Appendix A: Lidar improvements and technical characteristics	138
4.3. Conclusion	145
CHAPITRE 5.....	147
5 SIMULATION DU SIGNAL LIDAR POUR L'ETUDE DES FORETS A L'ECHELLE GLOBALE	147
5.1. Introduction	147
5.2. Article: End-to-End Simulation for a Forest-Dedicated Lidar onboard a Satellite ..	148
1. Introduction	150
2. Methodology	151
2.1. Overview	151
2.2. Direct Model	153
2.3. Inverse Model	158
2.4. Sampling Sites	159
2.5. Adjustment of Parameters: Relevance of the Direct Model	162
3. End-to-End Modeling	163
3.1. Laser Footprint Size	163
3.2. Optimal SNR and Related Uncertainties	164
3.3. Lidar Signal Distortion	165
4. Link Budget	167
4.1. Link Budget under Ideal Atmospheric Conditions	167
4.2. Link Budget under Realistic Atmospheric Conditions	169

5. Discussion and Conclusions	173
Appendix A: Sources of Noise	174
Appendix B: Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) Retrieval	175
References.....	177
5.3. Compléments d'étude	183
5.3.1. Erreur relative sur l'effet de la pente	183
5.3.2. Diffusion multiple.....	184
5.4. Conclusion	185
CHAPITRE 6.....	187
6 CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE	187
6.1. Conclusion.....	187
6.2. Perspectives	189
6.2.1. Intérêt d'un lidar multi-voies	189
6.2.1.1. Multi-voies de réception avec différentes densités optiques.....	189
6.2.1.2. Multi-voies avec multi-longueurs d'onde	189
6.2.2. Synergie instrumentale	190
6.2.3. Système mixte forêt-atmosphère	191
6.2.4. Assimilation des données lidar canopée.....	192
6.2.5. Un lien avec la dynamique et la ressource éolienne.....	192
BIBLIOGRAPHIE	193
ANNEXE A – PROFIL SCIENTIFIQUE	203
A.1. Liste des publications	203
A.2. Liste des Communications	204
A.3. Campagnes de mesures	205
A.4. CV	206
ANNEXE B – AUTRES VALORISATIONS	207
B.1. Abstract de l'article de Chazette et al., ACP, 2014.....	207
B.2. Abstract de l'article de Dieudonné et al., ACPD, 2014.....	208

CHAPITRE 1

1

Introduction

1.1. Contexte scientifique général

Démontrer l'intérêt de l'observation des forêts par la télédétection active lidar à l'échelle globale est le principal objectif de ce travail de thèse. Les écosystèmes forestiers sont des environnements primordiaux pour la biodiversité et ils jouent un rôle fondamental sur le climat de la Terre. Bien avant l'arrivée de l'homme sur la planète ils interagissaient déjà fortement avec l'atmosphère terrestre et les autres compartiments du système Terre. Ils sont des sources, des puits et des réservoirs de divers composés présents dans l'atmosphère. Dans cette introduction, nous allons nous attarder quelque peu sur l'histoire de l'évolution de la composition de l'atmosphère de la Terre, ses interactions avec la surface et sur les grands enjeux environnementaux de notre époque. Tout ceci sera présenté pour bien montrer l'importance de la forêt pour la conservation de l'équilibre fragile qui a permis et permet encore de maintenir la vie sur Terre comme nous la connaissons. On ne perdra pas de vue l'objectif principal de ce travail de thèse qu'est la recherche d'un outil performant pour le suivi de l'évolution des forêts à l'échelle globale. Cet instrument sera d'autant plus performant qu'il pourra permettre des mesures simultanées dans les milieux atmosphérique et forestier.

1.1.1. L'évolution de la composition chimique de l'atmosphère

Au cours des dernières décennies, des changements climatiques à grande échelle ont été mis en évidence. A partir des observations effectuées dans le monde entier (e.g. IPCC, 2013), on a trouvé non seulement des augmentations indéniables sur les indicateurs de changements climatiques, mais également des progressions très rapides dans le rythme de ces augmentations : la température à l'échelle globale à la surface de la Terre a augmenté de 0.85 [0.65 à 1.06] °C pendant la période 1880-2012, alors qu'elle était de 0.72 [0.49 à 0.89] °C pour la période 1951-2012 (Hartmann et al., 2013). Cette augmentation a été légèrement plus importante sur l'Europe puisqu'elle était de 0.95°C au cours du 20^{ème} siècle. Simultanément, le niveau moyen global des mers est monté de 0.19 [0.17 à 0.21] m

pour la période 1901-2010, avec une vitesse d'augmentation de $3.2 [2.8 \text{ to } 3.6] \text{ mm} \cdot \text{yr}^{-1}$ entre 1993-2010 (Rhein et al., 2013). Ces différentes augmentations sont à mettre en rapport avec les charges atmosphériques de gaz à effet de serre (well-mixed green-house gases en l'anglais) qui ne cessent d'augmenter dans l'atmosphère, comme la concentration en dioxyde de carbone, en méthane, en ozone, en composés azotés, en composés organiques volatiles, en composés organochlorés, et en particules absorbantes comme les aérosols de combustion (Hartmann et al., 2013).

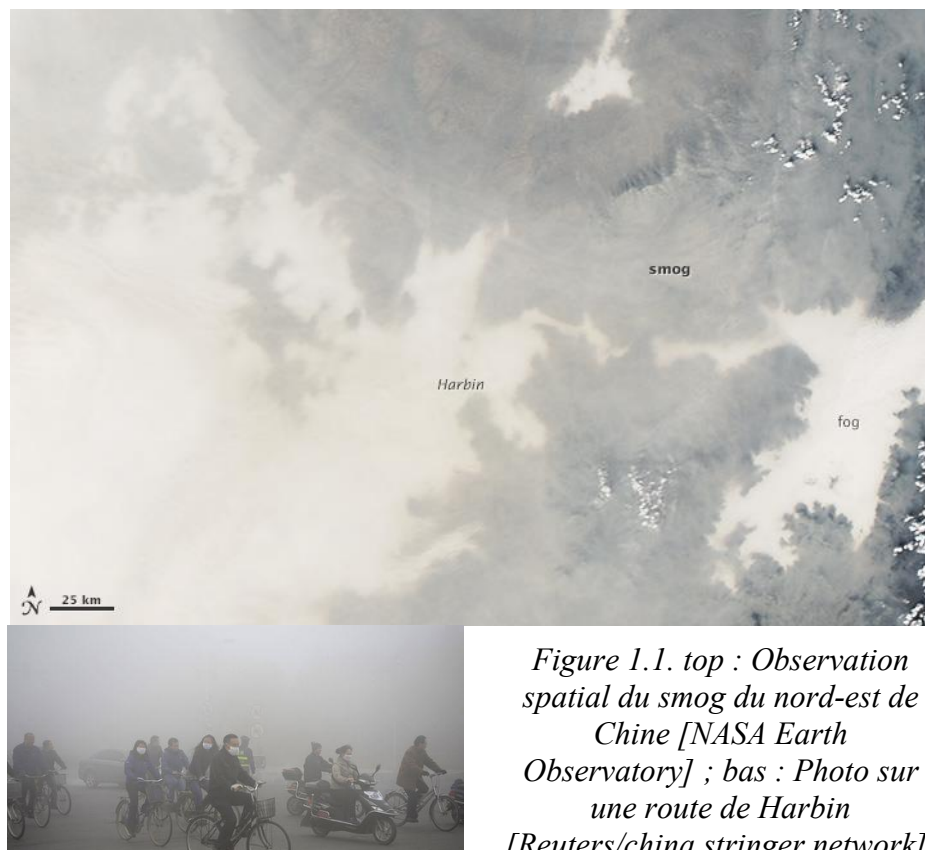


Figure 1.1. top : Observation spatiale du smog du nord-est de Chine [NASA Earth Observatory] ; bas : Photo sur une route de Harbin [Reuters/china stringer network], 21/10/2013.

Les problèmes environnementaux ont pris une importance croissante dans notre vie au quotidien. Plusieurs épisodes ont montré le « mécontentement de l'environnement » : Le "Dust bowl" des années 1930 aux États-Unis a forcé un demi-million de fermiers à abandonner leurs terres. Le "smog de Londres" de 1952 a tué plus de 4000 Londoniens en quelques jours. Le Typhon Nina de 1975 a endommagé gravement 62 barrages (incluant le barrage de Banqiao) dans plusieurs provinces en Chine où ~26 000 personnes moururent directement à cause de l'inondation et ~145 000 autres durant les épidémies et la famine qui suivirent. La canicule de l'année 2003 a eu pour conséquence une surmortalité importante estimée à ~15 000 personnes en France. La sécheresse, qui sévit depuis trois décennies en Afrique de l'Ouest, a favorisé l'émergence de la borréliose à tiques. Récemment, pendant le "smog de China Eastern" de 2013, la visibilité dans la ville de Harbin (Figure 1.1) était réduite à moins de 50 m en générale et à moins de 10 m dans certaines zones, plusieurs aéroports et routes ont été fermés, ainsi que des écoles primaires et secondaires.

Le Changement climatique est un phénomène très complexe, il est le résultat d'interactions nombreuses entre les différents compartiments du système Terre que sont l'atmosphère, l'océan, la cryosphère et de la biosphère. L'océan par son inertie, l'atmosphère par sa composition (e.g. les gaz à

effet de serre d'origine anthropique), la surface terrestre par son albédo et son émissivité (les types d'occupation du sol, la température, l'hygrométrie), la cryosphère par son stockage d'eau douce jouent des rôles fondamentaux sur le changement climatique en réponse au forçage solaire. Ce sont des éléments clé de ce que l'on appelle "la machine climatique".

Grâce aux études scientifiques réalisées ces dernières années, il est indiscutable que l'origine du changement climatique réside dans l'augmentation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. De nombreuses activités humaines sont à l'origine de l'émission de gaz à effet de serre comme l'industrie et les transports. Le principal gaz à effet de serre est la vapeur d'eau, mais c'est le gaz carbonique (CO₂) qui est surtout responsable du forçage additionnel. Il est suivi par le méthane dont la concentration risque d'augmenter rapidement au-cours du 21^{ème} siècle avec le réchauffement des zones polaires qui sont des réservoirs importants de ce gaz via les hydrates de méthane. Les gaz à effet de serre ont des durées de vie suffisamment longues pour être transporté à l'échelle globale et s'accumuler dans l'atmosphère. L'un des puits principaux de ces composés est activé par les échanges surface/atmosphère dans lesquels l'océan et la biosphère sont les interfaces majeurs.

1.1.1.1. L'atmosphère et la vie

L'atmosphère est l'un des grands acteurs du climat : elle agit comme un filtre pour les échanges d'énergie entre la Terre et l'espace et elle est en mouvement permanent afin de jouer son rôle de machine thermique qui va redistribuer l'énergie du soleil des basses vers les hautes latitudes.

Année	Type d'atmosphère	Composition
4.5 milliards d'années	Atmosphère primitive	He et H
4.4 milliards d'années	Atmosphère primaire	H ₂ O : 85%, CO ₂ : 10 à 15 %, N ₂ : 1 à 3%
4 milliards d'années	Atmosphère secondaire	Pendant cette période la composition de l'atmosphère passe de sa composition primaire à la composition actuelle
3.2 milliards d'années	L'atmosphère devient vivable	N ₂ : 78%, O ₂ : 21%, H ₂ O : variable, CO ₂ : 0.036%
2 milliards d'années	Atmosphère actuelle	N ₂ : 78%, O ₂ : 21 %, H ₂ O : variable, CO ₂ : 0.036%
aujourd'hui		

Tableau 1.1. Evolution de la composition de l'atmosphère. Source : <http://www2.ac-lyon.fr/etab/colleges/col-42/massenet/aps/>

Il y a 4.5 milliards d'années, la Terre s'est formée par l'accrétion de particules à l'intérieur d'un grand nuage interstellaire qui était à l'origine du système solaire. La température à la surface du globe terrestre était alors supérieure à 1500 °C. L'association entre le dioxyde de carbone (CO₂) et le calcium (Ca) en milieu aqueux a conduit à la formation de calcaire (carbonate de calcium, CaCO₃), qui a précipité au fond des mers et des océans pour former les premières roches sédimentaires. Cette réaction chimique a diminué de façon importante la teneur en CO₂ et en vapeur d'eau (H₂O) de l'atmosphère. L'effet de serre engendré par le CO₂ a ainsi diminué et la température de la surface a

baissé pour atteindre $\sim 100^\circ\text{C}$. L'azote (N_2) est alors devenu le constituant majeur de l'atmosphère terrestre pendant que les teneurs en CO_2 ont continué de diminuer (Tableau 1.1). La vie apparaît sous forme de bactéries dans les océans de 3.2 à 2 milliards d'années par rapport à notre ère et elle produit de grandes quantités d'oxygène. L'atmosphère qui était principalement réductrice devient au fur et à mesure oxydante suite aux émissions d'oxygène en provenance de l'océan. La présence de dioxygène (O_2) dans l'atmosphère permet la diversification des formes de vie dans et hors des océans. Elle permet également l'apparition d'une couche d'ozone (O_3) stratosphérique qui va protéger la vie naissante à la surface des continents primaires. La vie peut donc progresser à la surface des continents sous les formes animal et végétale. L'évolution va entre-autre conduire à l'apparition du premier arbre il y a entre 350 et 420 millions d'années, au cours du Dévonien. Ce Progymnosperme qui se reproduit à l'aide de spores, comme les fougères, s'appelle *Archaeopteris*. Son bois ressemble à celui des conifères, son tronc est épais et il peut mesurer jusqu'à 50 m. Il forme les premières grandes forêts au moment où la vie animale colonise les continents.

1.1.1.2. Gaz à effet de serre

L'atmosphère actuelle est composée essentiellement d'azote (78.08%) et d'oxygène (20.94%). Elle contient également d'autres constituants minoritaires qui jouent un rôle essentiel sur le climat. En effet, les gaz à effet de serre piégés dans les basses couches accumulent la chaleur du corps noir terrestre et régulent en grande partie l'équilibre radiatif de la Terre. La vapeur d'eau est le principal régulateur qui permet l'existence d'une température moyenne de $\sim 18^\circ\text{C}$ à la surface de la Terre, propice au maintien et au développement de la vie telle que nous la connaissons.

L'impact climatique des gaz à effet de serre a été fortement amplifié depuis le début de l'ère industrielle, définie comme début de l'année 1750 (IPCC, 2007). Les activités industrielles ont été pointées du doigt pour leur contribution active au réchauffement de la planète par le rejet de nombreux gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Malgré l'absorption naturelle de ces composés par la végétation (principalement les forêts) et les océans, leur concentration ne cesse d'augmenter. Les propriétés radiatives de l'atmosphère sont fortement influencées par des gaz à effet de serre, principalement le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et des oxydes d'azote (N_2O), qui ont fortement augmenté, majoritairement à cause des rejets anthropiques.

La concentration atmosphérique de CO_2 a augmenté de 40% entre 1750 (278 ppm) et 2011 (390.5 ppm) pour deux raisons principales : 1) l'usage croissant et omniprésent de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) lié au développement industriel et technologique ; 2) le changement dans l'utilisation des sols (« land use ») incluant principalement la déforestation. Durant la même période, le CH_4 et le N_2O ont augmenté de 150% et 20% respectivement. Les hydrofluorocarbure (HFC), les perfluorocarbures (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF_6) augmentent tous également rapidement, mais leurs contributions au forçage radiatif sont moins de 1% car encore en faibles concentrations dans l'atmosphère (Hartmann et al., 2013). Il faut tout de même noter que si les concentrations de ces molécules complexes devaient encore augmenter, elles pourraient induire un effet de serre additionnel significatif par le nombre de raies spectrales insaturées qui leur sont associées.

Aujourd'hui, l'émission de CO_2 anthropique excède la capacité d'absorption de la nature. Ainsi, d'ici 2050, on prévoit le doublement de la teneur en CO_2 de l'atmosphère par rapport au début de l'ère industrielle. Les conséquences d'un tel phénomène ne sont pas parfaitement prévisibles, mais il ne fait

aucun doute que l'on observera une augmentation des températures et du niveau moyen de la mer, ainsi qu'une redistribution des ressources naturelles, notamment en eau potable.

1.1.1.3. **Aérosol**

Les gaz à effet de serre ne sont pas les seuls acteurs influençant le climat du système couplé Terre/Atmosphère, un autre acteur important est « l'aérosol ». L'aérosol est un corps complexe que l'on trouve également dans l'atmosphère. Il y est soit injecté directement par émission à la source, soit produit par des réactions chimiques gaz-particule (Chazette et al., 2005).

La présence d'une quantité accrue d'aérosols d'origine anthropique pourrait partiellement compenser les effets radiatifs des gaz à effet de serre (IPCC, 2007; Léon et al., 2002; Ramanathan et al., 2001a, 2001b; Rasch et al., 2001), ils ont également un rôle important sur la chimie de l'atmosphère en influençant par exemple les taux de photolyse (Randriamiarisoa et al., 2004). Cependant, les rôles climatique et sur la santé des aérosols anthropiques restent encore mal connus. Comparativement à d'autres polluants, comme l'ozone, les composés soufrés, les oxydes d'azotes et les hydrocarbures, son évolution dans l'atmosphère reste encore mal prise en compte par les modèles de chimie-transport qui progressent néanmoins rapidement grâce aux approches d'assimilation (Wang et al., 2013b).

Les aérosols anthropiques (~10% de la concentration en masse moyenne des aérosols atmosphériques) sont émis principalement par les grandes mégapoles telles que Paris, Londres, Beijing ou Le Caire, mais également par les grands centres industriels ou suite à la destruction de la biomasse par le feu. Leur flux d'émission moyen annuel n'est pas connu avec précision. C'est pourquoi plusieurs programmes de recherche ont été soutenus en France. Comme les mégapoles (plus de 10 millions d'habitants : seuil fixé par l'ONU) sont des sources prépondérantes qui ne feront que s'amplifier dans le monde au 21^{ème} siècle, la mégapole parisienne s'est trouvée au centre de ces programmes via le programme européen MEGAPOLI (Royer et al., 2011). Elle fait partie des 3 mégapoles présentes en Europe avec Londres et Moscou.

Selon le « sixième recensement national de la population de la République populaire de Chine » en 2010, la Chine comporte 4 mégapoles dont Shanghai dépassent 20 millions d'habitants. Les plus grandes mégapoles (Figure 1.2) sont Tokyo au Japon, Séoul au Corée, Mexico au Mexique, New York aux États-Unis. Les émissions de ces grands centres de vie associées aux complexes industriels vont avoir un impact dépassant la région via le transport des masses d'air. Ce transport sera néanmoins limité pour les aérosols dont la durée de vie moyenne est de 7 jours dans la troposphère libre et de l'ordre de la journée dans la couche limite atmosphérique. On aura donc un impact radiatif très hétérogène des aérosols dans l'espace et dans le temps à l'échelle de la planète.

Les principales sources d'aérosol sont d'origines naturelles. Elles sont liées aux déserts, dont principalement le Sahara puis le désert de Gobi en Chine (Mikami, 2005; Wang et al., 2013a), et aux océans via l'injection dans l'atmosphère de nombreux sels (O'Dowd and Smith, 1993). D'une manière générale, les aérosols naturels présentent un mode grossier plus prononcé à la différence des aérosols anthropiques qui occupent plutôt les modes de nucléation et d'accumulation (Seinfeld and Pandis, 1998; Whitby and Cantrell, 1976). Une différence importante est liée aux émissions par la forêt. Cette dernière émet de nombreuses matières biologiques dans le mode grossier comme les pollens ou les débris de feuille, mais également des gaz précurseurs d'aérosol organiques (aérosols organiques

secondaires) qui eux se situent dans le mode d'accumulation (William C. Hinds, 1999). Ils vont donc avoir un rôle sur la chimie ou le climat similaire à celui de certains aérosols anthropiques.

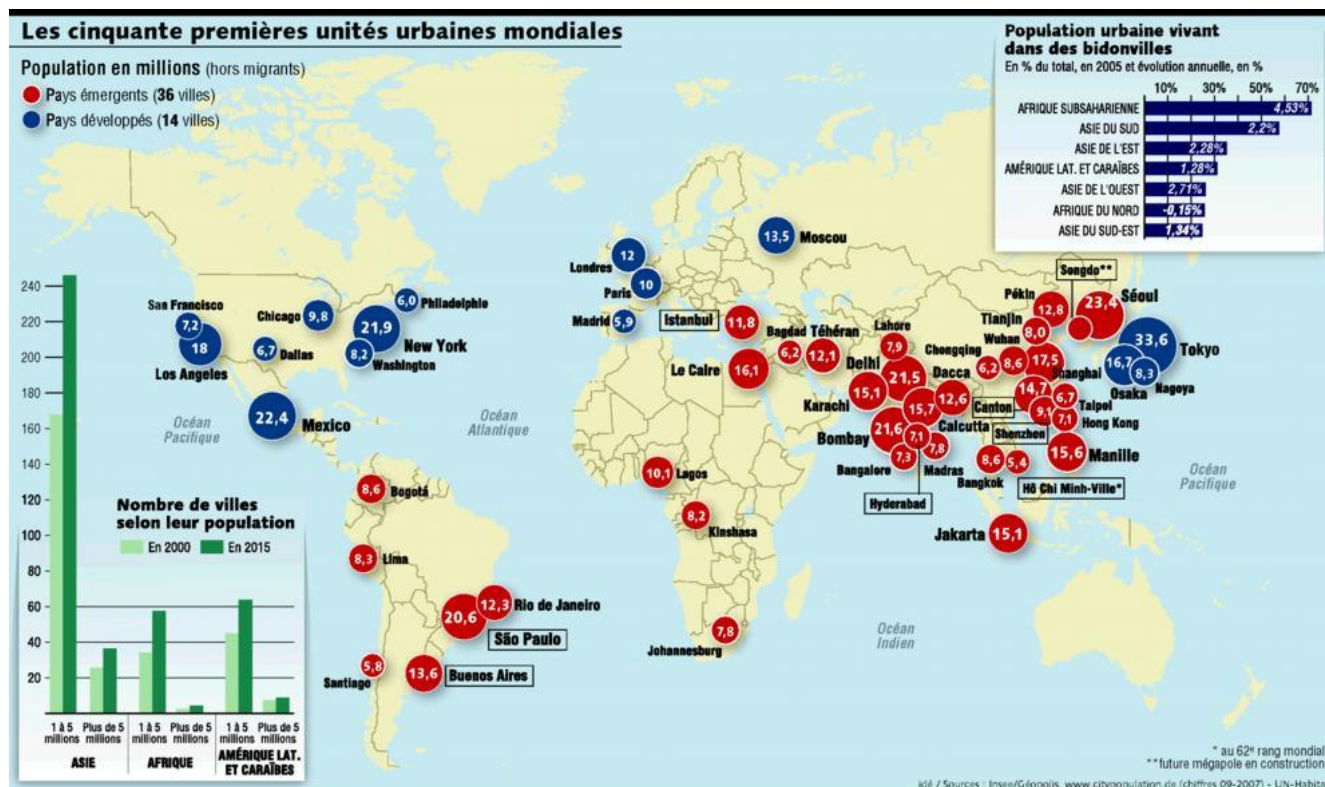


Figure 1.2. Les cinquante premières unités urbaines mondiales. Données du 09-2007. Source : <http://www.histege.com/article-megapoles-et-megalopoles-104236729.html>

1.1.1.4. Propriétés photo-oxydantes

Une grande partie des composés organiques volatiles émis dans l'atmosphère à partir de la surface va être oxydée ou photolysée dans la basse et moyenne troposphère (IPCC, 2007). Ces processus d'oxydation aident au « nettoyage » de l'atmosphère et empêchent par exemple plusieurs polluants réactifs de rejoindre la couche d'ozone stratosphérique. Près de 90% du méthane est éliminé dans la troposphère par oxydation avec le radical hydroxyle OH. Néanmoins, les produits d'oxydation ne sont pas tous inoffensifs et peuvent également contribuer à la pollution atmosphérique.

La pollution photochimique (ou pollution photo-oxydante) est un ensemble de phénomènes complexes qui conduisent à la formation d'ozone et d'autres composés oxydants (peroxyde d'hydrogène, aldéhydes, Peroxy Acétyl Nitrate ou PAN) à partir de précurseurs principalement composés d'oxydes d'azote et de composés organiques volatils (COVs). Ces différentes réactions ont lieu dans les couches les plus proches du sol et font donc intervenir les propriétés de la surface, et par cette voie, le type d'occupation des sols. Le volume d'émission est une grandeur fondamentale à l'estimation des concentrations des composés minoritaires dans l'atmosphère, mais il reste difficile à évaluer surtout au-dessus de milieux complexes comme les régions urbaines, industrielles ou les forêts.

1.1.2. Contexte économique, social et politique

1.1.2.1. *L'humain et le changement climatique*

Les flux anthropiques, à l'inverse des flux naturels, ne sont pas équilibrés. L'Homme de par son accroissement démographique et le développement économique qu'il génère est désigné comme le principal responsable du changement climatique observé. Les conséquences prévues, si rien n'est fait pour infléchir la tendance actuelle, s'avèreraient catastrophiques pour les populations et les écosystèmes futurs.

Pendant des millénaires l'homme a puisé dans son environnement afin de subsister. Tout d'abord il s'agissait pour lui de se nourrir, puis il a su transformer ce qui l'entourait pour améliorer ses conditions de vie. L'homme a fait reculer la forêt et a utilisé le bois pour se chauffer et se construire des abris pour se protéger. Il a modifié le paysage pour exploiter la terre et en tirer des aliments. Ces atteintes à l'environnement n'avaient qu'un impact très limité du fait de la faible densité de population et de la simplicité des techniques d'exploitation employées. Jamais l'équilibre écologique n'avait été réellement perturbé. C'est avec l'augmentation de la population et le développement des industries que la pollution a commencé à gagner du terrain. Avec la Révolution Industrielle du XIX^{ème} siècle, les techniques de production se sont fortement améliorées et multipliées. De nombreuses substances nocives ont alors été déversées dans tous les milieux, sol, eaux et air, dans des proportions importantes. A cette époque, l'idée de risque pour le milieu naturel ou pour la santé humaine était balayée par la course folle aux progrès scientifiques et technologiques.

Après la Seconde Guerre Mondiale, l'intensification de ces actions néfastes sur l'environnement s'est poursuivie et amplifiée, avec la reconstruction de l'Europe. L'utilisation des carburants fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel) pour le transport ou la production d'énergie dans les centrales thermiques a entraîné une diversification des gaz émis dans l'atmosphère. Il a été possible de constater, par exemple, la forte augmentation des teneurs en dioxyde de carbone, issu des combustions. Par ailleurs, le développement de l'industrie chimique a permis l'apparition de nouveaux polluants et la multiplication des composés émis dans notre environnement.

L'impact de l'homme sur son environnement n'est pas uniquement un effet à moyen ou long terme et à grande échelle, il a également un impact local ou régional immédiat. En effet, les concentrations de population dans les agglomérations avec la multiplication des mégalo-poles, et donc des moyens de production et de transport, impliquent des teneurs importantes en composés plus ou moins nocifs et à plus courte durée de vie que les gaz à effet de serre. La multitude de composés, rejetés dans des espaces limités, interagissant entre eux ou sous l'effet du rayonnement solaire induit de nombreux mécanismes de pollution dans tous les milieux (eau, sol, air). Ainsi, les activités humaines impliquent l'augmentation des hydrocarbures, des composés soufrés et des oxydes d'azote dans les basses couches de l'atmosphère. Elles induisent une production de photo-oxydants et une acidification de la troposphère. La pollution acide (ou pluies acides) est liée aux polluants acides (SO_2 , NO_x , NH_3 , HCl , HF) émis par les activités humaines qui retombent en partie à proximité des sources, mais aussi à des centaines, voire des milliers de kilomètres de leurs sources émettrices. Ces polluants se déposent sous forme de retombées sèches ou humides. Pendant le transport, ces polluants se transforment. Le dioxyde de soufre (SO_2) et les oxydes d'azote (NO_x) se transforment en sulfates (SO_4^{2-}) et en nitrates (NO_3^{2-}) dans le cas où l'atmosphère est sèche, ainsi qu'en acide sulfurique (H_2SO_4) et en acide nitrique

(HNO₃) dans le cas où l'atmosphère est humide. Les retombées acides ont ensuite des effets sur les matériaux, les écosystèmes forestiers, les exploitations agricoles et les écosystèmes d'eau douce.

1.1.2.2. *Politiques Environnementales*

Nom de l'action	Année	Objectif
Convention de Washington	1973	Veiller à ce qu'aucun commerce mette en danger la pérennité d'une espèce animale dans son milieu naturel
Convention MARPOL	1973	Réglementer les pratiques en vue de diminuer les pollutions marines
Protocole de Montréal	1987	Stopper les dégâts causés à la couche d'ozone, notamment en interdisant l'usage des chlorofluorocarbures et d'autres gaz nocifs pour la couche d'ozone
Convention de Bâle	1989	Réglementer le commerce des déchets, en interdisant notamment l'exportation de déchets des pays développés vers les pays en voie de développement pour échapper aux réglementations locales
Sommet de la Terre à Rio de Janeiro	1992	Mise en œuvre du développement durable au niveau des territoires.
CCNUCC	1994	Mise en place un cadre global de l'effort intergouvernemental pour faire face au défi posé par les changements climatiques.
Protocole de Kyoto	1997	Réduire les émissions en gaz à effet de serre, avec des objectifs chiffrés, pour essayer de limiter le réchauffement climatique
Convention OSPAR	1998	Protéger et préserver l'Atlantique du Nord-Est et ses ressources
Convention de Stockholm	2001	Protéger la santé humaine et l'environnement des polluants organiques persistants
Sommet de Copenhague	2009	Le bilan est mitigé qui a entamé la préparation de l'après-Kyoto, et essayé de lui donner un nouveau souffle en décidant d'engagements chiffrés en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre

Tableau 1.2. *Les actions environnementales.*

A la fin des années 1970, suite à une prise de conscience collective, de nombreuses politiques ont été mises en place à l'échelle nationale, internationale et mondiale pour encadrer les problèmes de pollutions. Les actions pour la protection de l'environnementales se sont multipliées : sommets internationaux, conventions et protocoles, journées mondiales, évolution des réglementations, etc., dont certaines sont listées dans Tableau 1.2. Des lois ont été émises dans plusieurs pays afin de réduire les émissions de certains polluants et des seuils à ne pas dépasser ont été définis que ce soit en Europe (e.g. www.airparif.asso.fr) comme aux Etats Unis. Ces seuils prennent principalement en compte l'exposition des populations.

Des efforts ont été faits au niveau international pour interdire ou limiter la production de certains gaz. L'interdiction des chlorofluorocarbones (CFC) lors du protocole de Montréal en 1987 en est un bon exemple, puisqu'elle a conduit à un infléchissement dans la destruction de la couche d'ozone stratosphérique. La charges atmosphériques des CFCs a effectivement diminuée depuis 2005

(Hartmann et al., 2013). Ce premier succès est tout de même limité car la modification du climat avec l'injection massive de gaz à effet de serre, dont en premier le CO₂, pourrait bien déstabiliser la stratosphère et venir amplifier la disparition de l'ozone dans cette région de l'atmosphère. La modification du climat a des effets socio-économiques qui se font déjà ressentir car elle conduit à l'exode de certaines populations à travers le monde, mais également à des ruptures dans les équilibres régissant les écosystèmes et met ainsi en péril la biodiversité de notre planète. Ceci a conduit à la création de la Convention cadre des Nations unies sur le Changement Climatique (CCNUCC) qui est entrée en vigueur en 1994 suite au sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992. Dernièrement, la conférence de Copenhague regroupait les 191 pays ayant ratifié la CCNUCC. Elle a souligné l'importance des forêts dans la régulation du changement climatique et tout particulièrement du CO₂ atmosphérique.

Au-delà des grandes conventions, il existe de nombreux accords et des programmes dédiés à la régulation et à la surveillance de la pollution et donc de la qualité de l'environnement, e.g. la Helsinki Convention (HELCOM) pour la protection de l'environnement marin de la Mer Baltique, la Barcelone Convention (MEDPOL) pour l'évaluation et le contrôle de la pollution de la région Méditerranéenne, la convention de Genève sur les polluants transfrontaliers à grande distance, etc.

1.2. Cycle du carbone en lien avec le milieu forestier

En écologie, et plus généralement en sciences de la Terre, un cycle biogéochimique est le processus de transport et de transformation cyclique d'un élément ou composé chimique entre les grands réservoirs que sont la géosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère, dans lesquels se retrouve la biosphère (Bolin and Cook, 1983). L'un des cycles les plus importants est le cycle du carbone. Il interagit fortement avec les cycles de l'azote, de l'eau et des aérosols.

1.2.1. Bilan du carbone

Le carbone est à l'origine de la Vie. Tous les êtres vivants sont construits à partir de composés dont la structure est essentiellement faite à partir d'atomes de carbone. Le carbone, sous forme de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂) contribue grandement à moduler le climat de la Terre.

Le cycle du carbone est fondamental dans le fonctionnement de la Terre, impliquant des échanges de composés carbonés entre l'atmosphère, la surface et l'océan et la biosphère. Le cycle du carbone est un des cycles élémentaires les plus complexes. Le carbone peut exister sous forme gazeuse (e.g. CO₂, CH₄, CO), sous forme aqueuse (e.g. CO₂ dissous, H₂CO₃, HCO₃⁻, CO₃²⁻), sous forme minérale (carbonates divers) ou sous forme organique (formule générique du formaldéhyde CH₂O). Du carbone à l'état élémentaire existe en tant que diamant, graphite ou charbon. Une vision schématique simplifiée du cycle du carbone à l'échelle globale est montré sur Figure 1.3.

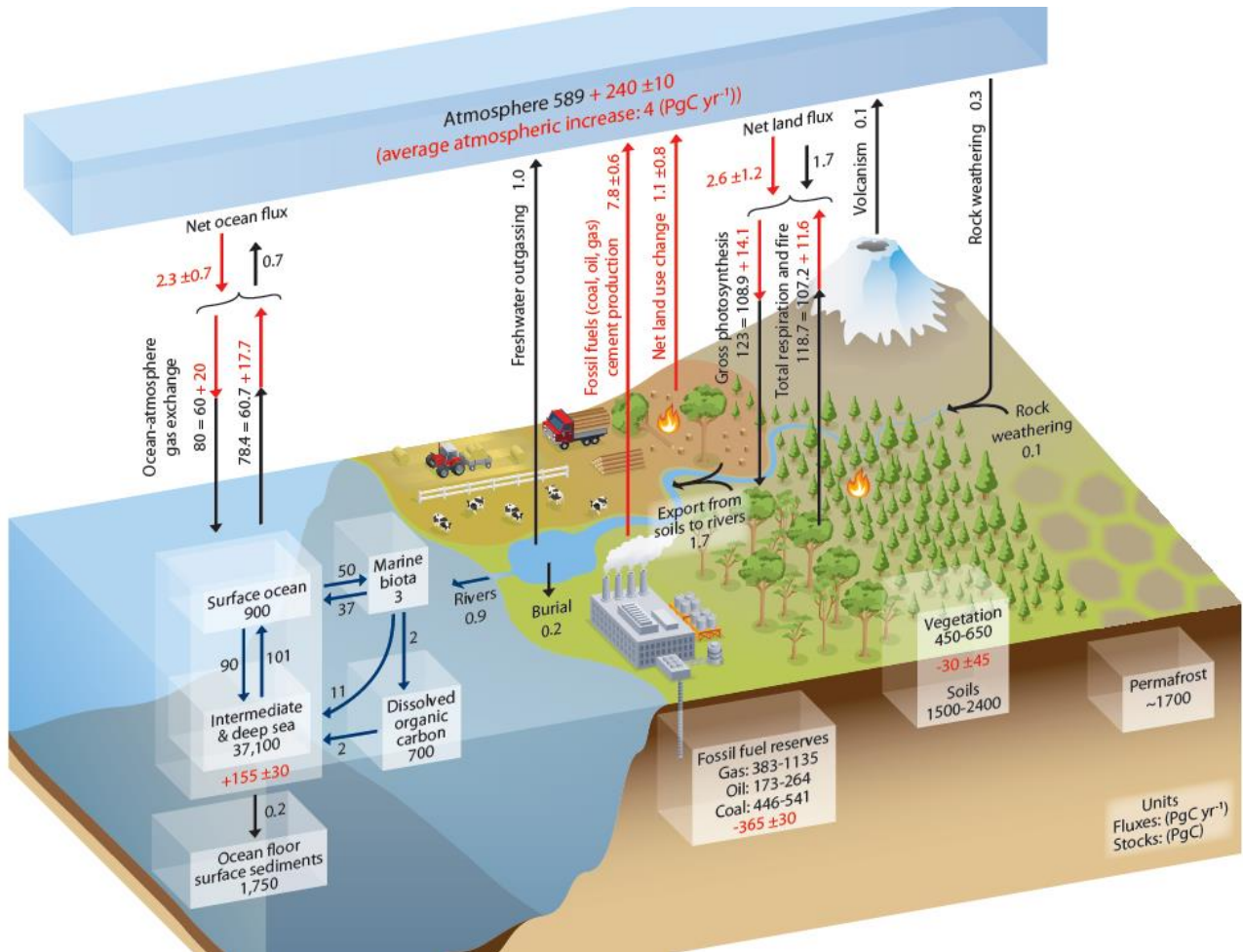


Figure 1.3. Schéma simplifié du cycle du carbone à l'échelle globale (Ciais et al., 2013). Les chiffres représentent les « stocks de carbone » (en PgC, 1 PgC = 10^{15} gC) et les flux annuels d'échange de carbone (en PgC·yr⁻¹) entre les différents réservoirs. Les chiffres/flèches noirs indiquent des valeurs estimées pour la période antérieure à l'ère industrielle (~1750) ; Les chiffres/flèches rouges indiquent des flux annuels "anthropiques" moyenné sur la période 2000-2009. L'absorption du CO₂ anthropique par l'océan et par les écosystèmes terrestres, souvent appelé « puits de carbone » sont les flèches rouges représentant les « Net land flux » et « Net ocean flux ».

1.2.2. Rejet du Carbone

Depuis plusieurs millénaires, la concentration atmosphérique du CO₂ était stable autour de 280 ppm (Figure 1.4), mais depuis 100-200 ans, elle augmente régulièrement pour atteindre 390.5 ppm en 2011 (Hartmann et al., 2013), même plus de 400 ppm en 2014.

L'augmentation est principalement due à la production de CO₂ par l'homme depuis le début de la révolution industrielle. En effet, l'homme brûle des combustibles fossiles (le pétrole, le charbon ou le gaz naturel) qui se sont accumulés pendant des millions d'années, libérant brutalement du CO₂, qui avait été absorbé et stocké sur une très longue période. L'industrie est, avec la production d'électricité et les transports, une des principales sources d'émission de ce gaz.

Autre point important à noter, l'augmentation actuelle du CO₂ provient également de l'amplification de la déforestation et de l'augmentation simultanée du nombre de feux de forêt, principalement en région tropicale. Il s'agit ainsi de la libération rapide d'une réserve de CO₂ (de quelques heures à

quelques jours) qui s'est constituée en un temps beaucoup plus long (de quelques années à plusieurs siècles, selon l'âge des arbres « partis en fumée »).

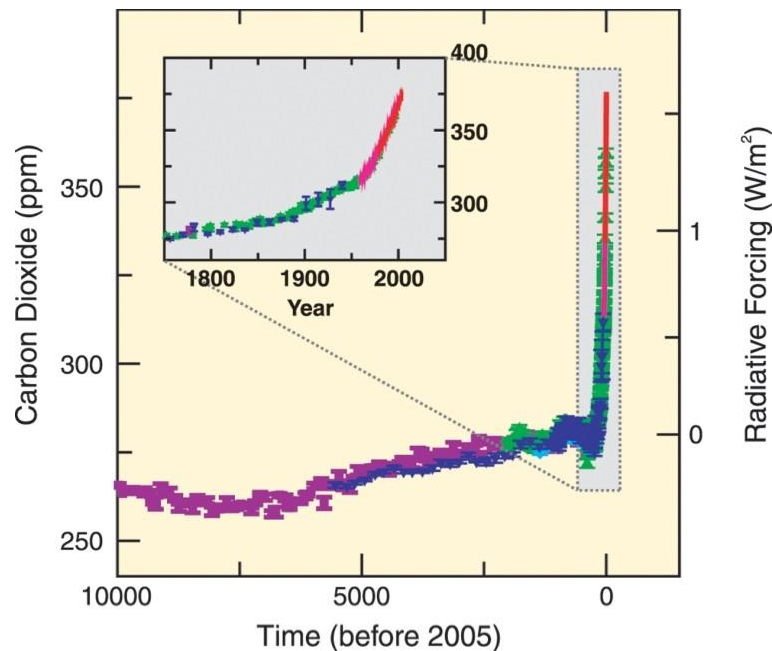


Figure 1.4. Evolution de la concentration atmosphérique moyenne du dioxyde de carbone depuis 10 000 ans. Les mesures proviennent des analyses des carottes de glace (points colorés, chaque couleur correspondant à une étude) ou de prélèvements d'air atmosphérique (ligne rouge). ©IPCC 2007 (Core Writing Team et al., 2007)

1.2.3. Stock du carbone

Les principaux puits de carbone sont aujourd'hui les océans, les sols (humus, tourbière) et certains milieux végétalistes (forêt en formation). Ils atténuent l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂. En effet, chaque année, environ la moitié du rejet de carbone anthropique est absorbée par les puits terrestres et océaniques, l'autre moitié s'accumule dans l'atmosphère. Mais, l'évolution de la température et des teneurs en vapeur d'eau de l'atmosphère pourrait diminuer significativement l'efficacité des puits naturels à absorber le CO₂.

L'océan, qui représente 70% de la surface du globe, est le plus grand réservoir de carbone de la planète. Il en renferme une quantité importante dissoute dans l'eau, car le CO₂ est très soluble dans l'eau froide (très peu dans l'eau chaude). La végétation océanique, c'est à dire le plancton (le phytoplancton), représente un puits de carbone. Celui-ci soustrait du CO₂ à l'atmosphère à travers la photosynthèse. Ce CO₂ absorbé, une fois digéré par d'autres organismes, ne réapparaîtra pas dans l'atmosphère, mais restera dans les océans, pour ensuite se déposer vers le fond sous forme de pelotes fécales ou une fois les organismes morts.

L'écosystème forestier (et en particulier le système arbre/sol) est le second puits principal de carbone naturel planétaire, essentiel au cycle du carbone. Il accumule d'énormes quantités de carbone dans le bois, les racines, le sol et l'écosystème via la photosynthèse. La Figure 1.5 montre le stock de carbone des différents puits hors océans. En fait, l'augmentation du CO₂ atmosphérique peut stimuler la photosynthèse chez les plantes (IPCC, 2007). Il semble que la biomasse absorbe plus de CO₂ qu'elle

n'en rejette (les processus de photosynthèse chez les plantes dépassent, en échanges nets, les processus de respiration des êtres vivants).

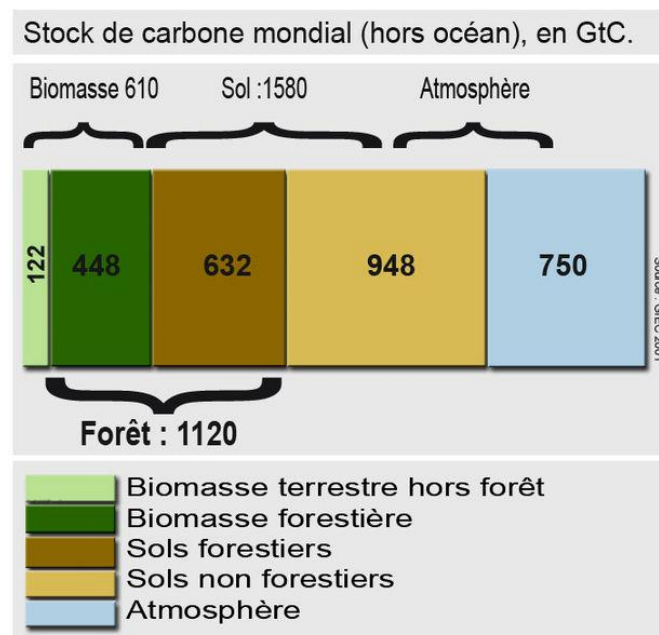


Figure 1.5. Stock de carbone dans le monde (hors océans). GtC : gigatonnes de carbone. Source : http://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AStock_carbone_mondial.jpg. Source données = GIEC (Intergovernmental Panel on Climate Change =IPCC) 2001

1.2.4. Boucles de rétroaction du cycle du carbone et climat

En déterminant l'apport de CO₂ à l'atmosphère, le cycle du carbone influence la température globale. Le rejet de CO₂ d'origine anthropique est responsable à 70% du réchauffement en cours. Mais, en retour, les concentrations atmosphériques de CO₂, la température globale ainsi que les précipitations influencent plusieurs éléments clés du cycle du carbone.

Au niveau de l'océan, il y a une rétroaction complexe liée à la solubilité du CO₂. Cette dernière évolue à l'inversement de la température. Ainsi, avec le réchauffement climatique, il y a plus de CO₂ libéré par les océans et il contribue à son tour au réchauffement du climat. C'est ce que l'on appelle une rétroaction positive. La solubilité du CO₂ dépend également de sa concentration dans l'atmosphère, ce qui limite l'effet de la rétroaction. La dissolution du CO₂ dans les océans entraîne une acidification des eaux. Les changements de température se répercutent donc aussi sur l'activité du plancton, ce qui peut augmenter ou diminuer son pouvoir de captage de CO₂ (Kumar et al., 2005; Martin, 1990).

Pour la végétation, et donc les forêts, si le taux de photosynthèse augmente avec la température et la concentration de CO₂ dans l'air, le taux de la respiration augmente lui aussi avec la température. Cet effet sur la photosynthèse des plantes est généralement positif. Un accroissement de la végétation terrestre a déjà été observé en réaction aux températures et au taux de CO₂ plus élevé dans l'atmosphère (IPCC, 2007). Mais, pour certains types de végétation, il a été observé que la respiration augmente plus en fonction de la température que la photosynthèse, ce qui pourrait faire de ces écosystèmes des sources et non des puits de carbone à long terme.

1.3. L'observation des forêts

D'une manière générale, on utilise de préférence la synergie instrumentale afin d'étudier les processus siégeant dans le milieu atmosphérique et à l'interface entre la surface et l'atmosphère. Diverses moyens d'investigation sont utilisés : instruments au sol, bateaux, bouées, profileurs océaniques, ballons, avions, capteurs embarqués sur les satellites, etc. (Figure 1.6). Nous allons rappeler ici quels sont les moyens d'observation principaux mis en œuvre afin de suivre l'évolution des milieux forestiers à différentes échelles allant de la parcelle à l'ensemble des surfaces continentales.

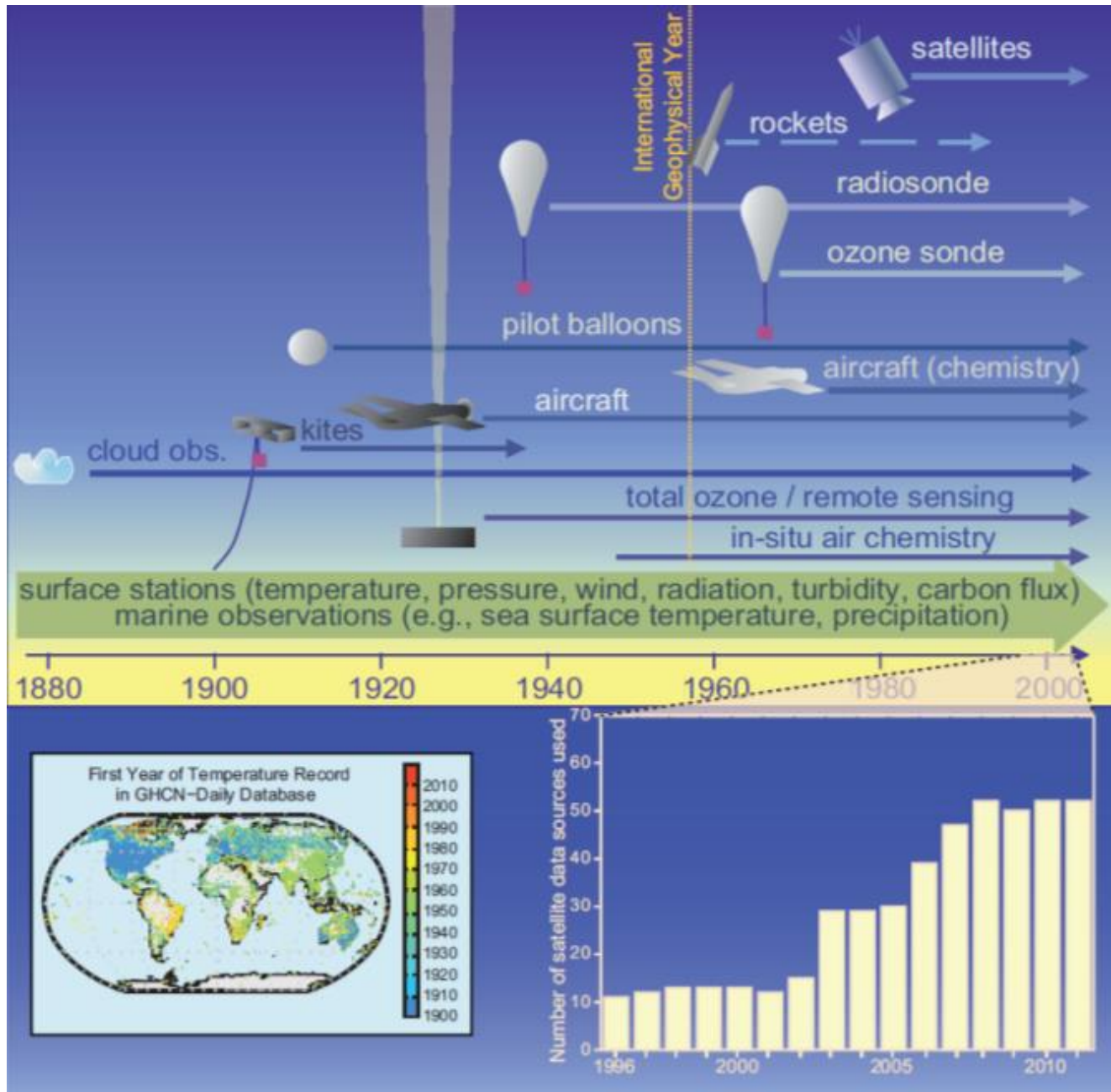


Figure 1.6. Top : Changement de la diversité croissante des méthodes d'observation. Bas à gauche : température annuelle dans la base de données quotidienne du « Global Historical Climatology Network », disponible à <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/ghcn-daily/>; (Menne et al., 2012). Bas à droite : nombre de satellites assimilées dans les modèles de l'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) chaque année de 1996 à 2010. (Cubasch et al., 2013)

1.3.1. L'importance de la forêt

Comme nous l'avons vu précédemment, le puits de carbone forestier est important à prendre en compte pour le bilan des émissions de gaz à effet de serre. La forêt occupe 30% de la superficie totale des terres (Figure 1.7), mais ce puits est très partiellement connu à l'échelle globale (de 0.9 à 4.3 GtC/an) et souvent déduit par différence entre les émissions (6.4 ± 0.4 GtC/an), l'accumulation dans l'atmosphère (3.2 ± 0.1 GtC/an) et les échanges avec l'océan (2.2 ± 0.4 GtC/an) (IPCC, 2007). Depuis l'époque préindustrielle, la biosphère terrestre a absorbé environ un quart des émissions de CO₂ anthropiques, dont 80% est absorbé par la forêt. La forêt joue donc un rôle en tant que régulateur du climat. On peut citer plus spécifiquement les derniers travaux de modélisation conduits sur la forêt française (Figure 1.8) qui ont montré qu'elle se comporte comme un important puits de carbone capable de séquestrer 10.5 MtC/an (Dupouey et al., 1999, 2010), soit 17% des émissions de carbone fossile de la France.

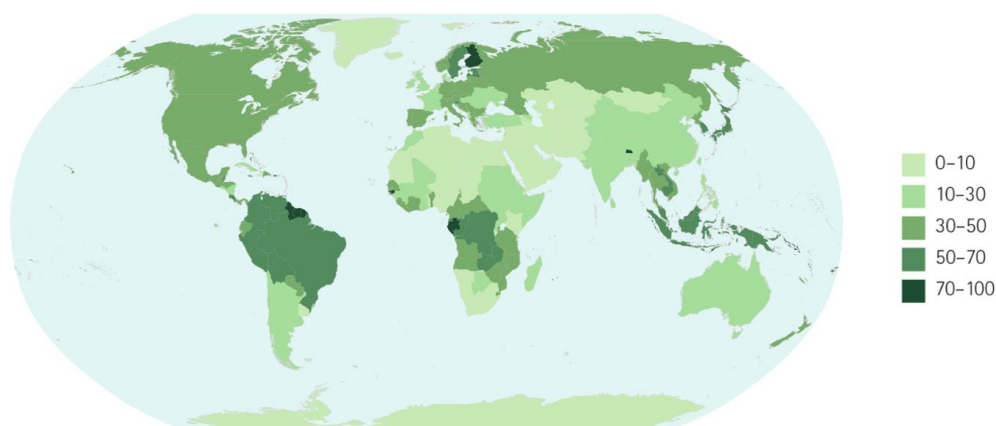


Figure 1.7. Superficie forestière par pays en pourcentage de la superficie totale des terres, 2010.
Source : FAO, Évaluation des ressources forestières mondiales 2010

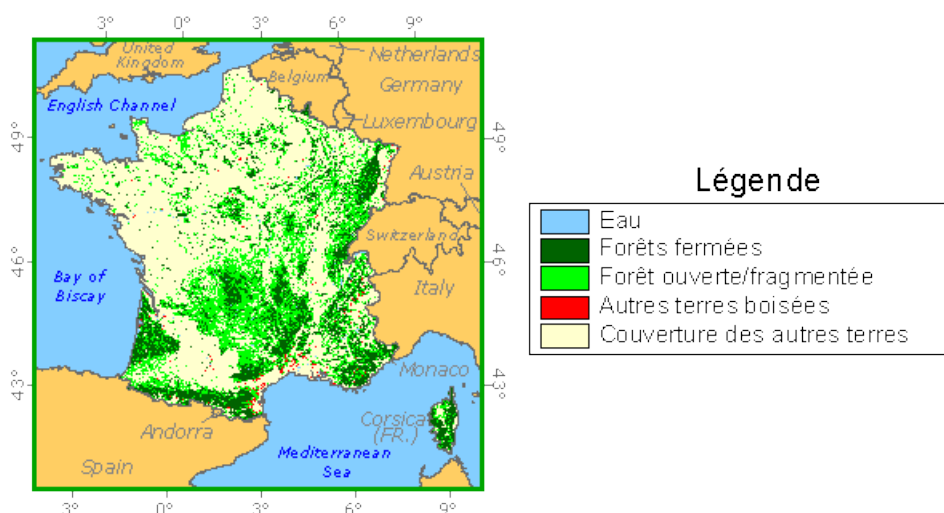


Figure 1.8. Forêt français. Source : FAO

En réponse au changement climatique, différents modèles prédisent un déplacement vers le Nord des aires géographiques potentielles des espèces végétales et animales. En France, Badeau et al. (2004) ont développé une approche statistique qui s'appuie sur les données forestières récoltées par l'IFN (Inventaire Forestier National, <http://www.ifn.fr>) et les données climatiques pour définir les niches

climatiques des principales essences françaises. Cette approche a été employée en utilisant les simulations climatiques par le modèle ARPEGE (Déqué et al., 1994) pour prédire les nouvelles aires climatiques sous climat futur. Les résultats obtenus montrent une très forte progression de l'aire climatique potentielle de deux espèces méditerranéennes qui sont le pin maritime et le chêne vert (moins contraintes par la température) et une régression du hêtre expliquée principalement par un déficit pluviométrique estival. La Figure 1.9 illustre l'évolution de l'aire climatique potentielle du pin maritime à l'horizon 2100 sous le scénario socio-économique le plus modéré (B2). Les forêts pourraient être un modérateur de l'augmentation du CO₂ atmosphérique, et donc du changement climatique, si les méthodes d'exploitation des écosystèmes étaient modifiées de manière appropriée.

Nous avons également vu que le rôle de la forêt n'était pas uniquement climatique. Par son interaction avec le milieu atmosphérique, elle va influencer fortement la physico-chimie de la troposphère et donc la qualité de l'air. On peut par exemple observer une augmentation significative de la concentration d'ozone dans la couche limite en été à cause des émissions de COVs biogéniques. Les aérosols secondaires formés à partir de ces composés biogéniques vont également influencer le bilan de rayonnement et la chimie multiphasiques dans la basse atmosphère.

Pour quantifier l'ensemble de ces effets et bien comprendre le fonctionnement de l'écosystème forestier il est nécessaire d'en connaître sa structuration interne qui reste encore mal connue à grande échelle. Connaître la structure forestière est en effet nécessaire pour comprendre la dynamique des écosystèmes ainsi que les relations complexes liant la biosphère et l'atmosphère.

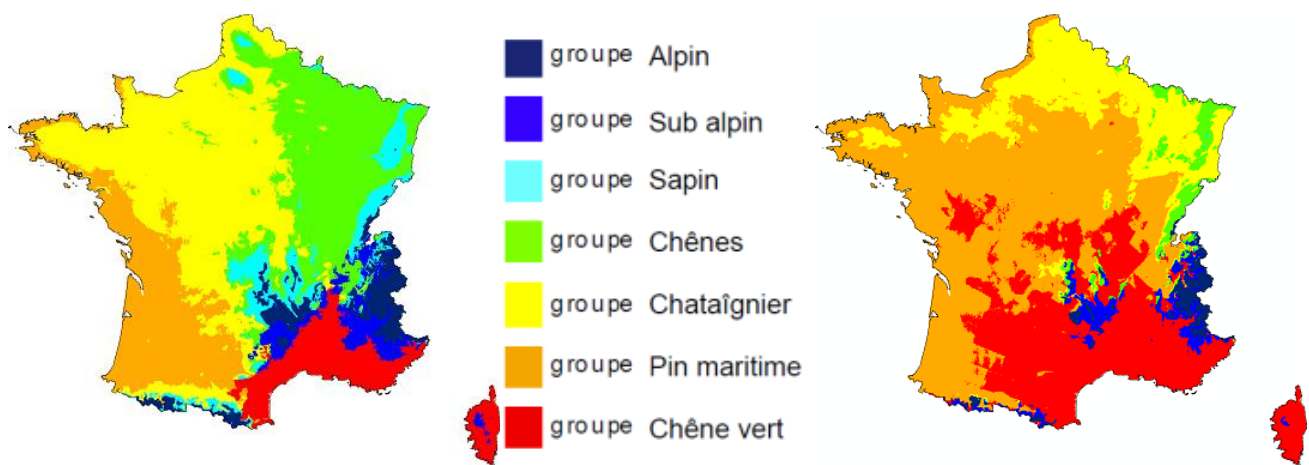


Figure 1.9 : Estimation par modélisation (modèle BIOMOD) de l'évolution des groupes chronologiques d'espèces entre l'actuel et 2100 (Badeau et al., 2004, 2010).

1.3.2. Etat de l'art

Les premiers travaux sur le fonctionnement et les impacts des écosystèmes forestiers ont été conduits suite aux inventaires forestiers nationaux effectués par différents pays comme les États-Unis, le Canada, la Norvège ou la France. Les inventaires au sol demeurent une méthode de base irremplaçable permettant d'assurer un suivi temporel à long terme des différents compartiments de carbone biosphérique : sol et végétation. Dans les méthodes à base d'inventaires, la biomasse forestière est estimée à partir d'une variable simple, le plus souvent le diamètre des troncs d'arbre à 1.3 m de hauteur qui est convertie en volume et en biomasse soit par des équations allométriques spécifiques (Ter-Mikaelian and Korzukhin, 1997; Zianis et al., 2005), soit par des facteurs de conversion et

d'expansion (Dupouey et al., 1999; Saint-André et al., 2010). Le dernier inventaire forestier pour l'ensemble des biomasses souterraine et aérienne a permis d'évaluer le stock de carbone des forêts françaises comme de l'ordre de 71.2 tC/ha (Dupouey et al., 1999, 2010; Pignard et al., 2006). C'est à partir de deux inventaires forestiers entre les années 1984 et 1996 que le flux annuel moyen net de carbone dans la biomasse des forêts a été estimé comme de l'ordre de 17.1 MtC/an (Dupouey et al., 1999). Shaiek *et al.* (2011) ont montré que l'âge des arbres peut être un coefficient dans les modèles allométriques pour augmenter la précision de l'évaluation de la biomasse. Chave *et al.* (2005) ont proposé des modèles plus précis pour évaluer la biomasse de la forêt tropicale avec beaucoup d'espèces d'arbres, en considérant le diamètre, la hauteur, la densité du bois et le type de forêt. Il ne faut néanmoins pas perdre de vue que ces campagnes d'inventaire sont lourdes, en particulier pour des caractérisations aux échelles du paysage ou de la région. Elles ont de ce fait une faible répétitivité temporelle (~tous les 10 ans).

L'évolution de la biomasse forestière a également été suivie à l'échelle globale à partir de l'espace. L'un des plus anciens moyens d'observation est Landsat Thematic Mapper (e.g. Goward and Williams, 1997 ; <http://landsat.usgs.gov/>), suivi par SPOT (e.g. Souza et al., 2005 ; <http://www.spot.com>). Des programmes de recherche et de surveillance ambitieux ont été planifiés sur la décennie à venir pour suivre l'évolution de la biomasse forestière aux niveaux semi-global ou global. Les systèmes actuels d'imagerie passive ou les systèmes radar permettent d'identifier les grands types forestiers et d'évaluer les biomasses forestières pour des niveaux faibles à intermédiaires. Le projet BIOMASS (http://www.esa.int/esaLP/SEMFCJ9RR1F-_index_0.html), qui prévoit l'utilisation d'un radar à synthèse d'ouverture (« SAR-Synthetic Aperture Radar » en anglais) embarqué sur satellite pour mesurer la biomasse forestière, en est une composante essentielle (Le Toan et al., 2011). Ce projet est inclus dans le programme « Earth Explorer » de l'ESA. Cependant, même si les développements récents en matière de technologie radar et de méthodes de traitement du signal permettent de repousser le seuil de saturation au-delà de 250 ou 300 tonnes de matière sèche par ha (Balzter et al., 2007; Garestier et al., 2008; Le Toan et al., 2004), la technologie Lidar apparaît également comme l'une des plus prometteuses pour évaluer les biomasses forestières (Asner et al., 2010; Cuesta et al., 2010) des échelles régionale à globale. En 2003, le système lidar GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) a été mis en orbite à bord du satellite ICESat. Bien que son objectif principal soit focalisé sur les calottes polaires, il a permis de mesurer la structure verticale de différentes régions forestières du globe (Boudreau et al., 2008; Brenner et al., 2003; Harding and Carabajal, 2005; Lefsky et al., 2005; Lim et al., 2003; Rosette et al., 2008; Schutz et al., 2005) et d'en déduire les quantités de biomasse après étalonnage sur des parcelles de références par des approches de type « inventaire forestier ».

Depuis plus de 10 ans, à des échelles plus régionales, des évaluations utilisant des systèmes lidar embarqués sur avions ont permis de réaliser des cartographies de la structure tridimensionnelle de certaines forêts et d'en déduire les quantités de biomasse et de carbone stocké (Asner et al., 2010; Blair et al., 1999; Nelson et al., 2003). Des relations ont été établies pour relier la quantité de carbone de la biomasse aérienne à la hauteur moyenne ou pondérée des arbres mesurées par lidar (Asner, 2009; Asner et al., 2010; Lefsky and Cohen, 2002; Means et al., 1999; Shang and Chazette, 2014). D'après Lefsky and Cohen (2002), l'avantage de la mesure lidar est qu'elle permet d'effectuer des mesures sur des couverts peu comme très denses (1200 t/ha de biomasse) sans saturation. Récemment, Asner and Mascaró (2014) proposent des relations entre la biomasse et la hauteur des arbres estimée à partir des données lidar par région.

En parallèle des approches diagnostiques, la modélisation mécaniste a connu un développement important depuis une vingtaine d'années. De nombreux modèles simulant les échanges carbonés dans les écosystèmes forestiers ont été développés. Ces modèles sont construits sur des bases écophysiologiques en modélisant les mécanismes physiologiques et biophysiques à l'échelle de l'organe et du couvert, et les différents forçages exercés sur ces mécanismes par les facteurs biotiques et abiotiques. Les principaux processus de photosynthèse, de respiration, d'allocation et de mortalité sont généralement considérés. Ces modèles permettent ainsi de représenter les différents flux et stocks de carbone et donc, en particulier, d'estimer l'accroissement de la biomasse forestière. Des modèles fins adaptés à l'échelle de la parcelle forestière de quelques hectares ont été développés comme par exemples CASTANEA (Dufrêne et al., 2005) ou Graeco (Porté, 1999). Il existe également des modèles globaux plus génériques comme ORCHIDEE (Krinner et al., 2005), LPJ, Biome BGC ou JULES adaptés aux échelles de grands types fonctionnels de végétation. Outre le contrôle exogène exercé par le climat considéré dans tous ces modèles, des progrès récents ont été réalisés au sein du modèle ORCHIDEE afin de tenir compte des pratiques de conduite sylvicole qui constitue l'un des facteurs déterminants de la capacité de stockage de carbone dans les forêts françaises gérées (Bellassen et al., 2011a, 2011b).

En comparaison aux modèles diagnostiques, la modélisation à base de processus écophysiologiques offre potentiellement le moyen de fournir à moindre coût des estimations des flux et stocks de carbone à différentes échelles spatiales, de la parcelle au globe, et à des pas de temps fins en tenant compte de la variabilité climatique et de l'action sylvicole dans le cas des forêts gérées. Par contre, ces modèles peuvent être assujettis à d'importantes erreurs dues à des connaissances insuffisantes des processus. Par ailleurs, ils sont gourmands, nécessitant un jeu de données conséquent pour la paramétrisation et la validation, la validation étant l'un des points les plus délicats de ces modèles.

La télédétection permet de fournir des observations à des résolutions spatiales et temporelles couvrant les différentes échelles d'applications des modèles à base de processus écophysiologiques. Alors que les apports par la télédétection passive optique et active radar pour l'estimation des attributs biophysiques, biochimiques et dendrométriques des couverts forestiers (indice foliaire, chlorophylle foliaire, biomasse, etc.) ont été évalués dans de nombreux travaux, les potentialités offertes par le lidar profileur pour l'étude des couverts forestiers restent encore mal quantifiées, principalement en terme d'incertitude. Le lidar profileur combine les avantages des deux approches citées ci-dessus. En raison des très courtes longueurs d'ondes employées, le signal réfléchi est très dépendant des propriétés géométriques des différentes composantes du couvert végétal. Il véhicule des informations sur la structure tridimensionnelle du couvert, en particulier la hauteur de la couronne supérieure, mais également sur la biomasse aérienne totale et sa distribution verticale au sein du volume végétal. Ces grandeurs sont d'une grande importance pour la modélisation à base de processus écophysiologiques car elles sont employées aussi bien en tant que variables d'entrées d'initialisation ou en tant que variables de validation. Elles peuvent également être utilisées dans des procédures d'assimilation de données qui ne sont pas encore très développées pour ce type de modèle. Les approches de type assimilation de données dans les modèles, déjà largement utilisée en météorologie et en qualité de l'air (Wang et al., 2013b), apparaît ainsi particulièrement prometteuse car elle permet de combiner l'avantage des deux approches diagnostique et de fonctionnement.

1.4. Organisation de la thèse

1.4.1. Objectifs

L'objectif principal de ma thèse est la conduite d'études de démonstration afin d'aider à la préparation d'une mission spatiale pour l'étude de la forêt à l'échelle globale à partir de la télédétection active lidar. A terme, ce travail de recherche doit permettre d'aider à une meilleure appréhension, et une meilleure compréhension, du rôle des activités humaines sur l'évolution à moyen et long terme de la biodiversité forestière. Une meilleure connaissance de la structure interne des forêts apportera également des contraintes fortes à la modélisation des échanges entre la forêt et l'atmosphère, et permettra ainsi une évaluation plus précise du flux biosphérique du CO₂ et d'autres espèces en trace dans la basse atmosphère.

De cet objectif principal se déclinent différents sous-objectifs :

- La prise en main du système lidar canopée ULICE (Ultraviolet Lidar for Canopy Experiment) qui a été développé au LSCE, et sa mise en opération en utilisant différentes configurations instrumentales dans le cadre de campagnes expérimentales aéroportées effectuées avec le soutien du CNES et du CEA. Ce travail nécessite la caractérisation amont de l'instrument en laboratoire et donc la création de bancs optiques d'étalonnage. Il doit permettre, entre autres, d'effectuer une première évaluation des stocks de carbone sur un périmètre forestier prédéfini.
- Le développement de méthodes inverses afin d'extraire les paramètres forestiers utiles à partir des profils lidar obtenus. Ce travail doit inclure une étude complète de l'influence des sources d'incertitudes liées à la physique de la mesure et aux hypothèses de travail.
- Le développement d'un simulateur de la mesure lidar à partir d'une plateforme spatiale. Ce simulateur doit être construit en utilisant comme contrainte les mesures aéroportées qui auront été conduites au-dessus de différents types de couverts forestiers. Il doit permettre l'évaluation du rapport signal sur bruit optimal à la détection des structures forestières à partir de l'espace, et ainsi la définition des caractéristiques du système lidar pour différentes configurations orbitales.
- Des premiers tests sur les forêts tropicales qui sont plus difficiles d'accès que les forêts tempérées. La pénétration du signal lidar dans le couvert forestier en fonction de sa structure interne doit être étudiée.

Nous verrons que j'ai mis en œuvre une démarche scientifique qui va de l'instrumentation jusqu'au simulateur numérique, en passant par les expériences aéroportées sur le terrain.

1.4.2. Plan de la thèse

Mon travail de thèse sera présenté en 6 chapitres incluant l'introduction et, les conclusions et perspectives de mon travail de recherche. C'est un document qui est rédigé en s'appuyant sur des articles scientifiques publiés ou soumis. Chaque article est introduit et discuté dans des chapitres spécifiques.

Le chapitre 2 est consacré à la présentation de ce qu'est la mesure lidar et de son application à l'étude du milieu forestier. On insistera principalement sur le profileur lidar dit en foresterie « lidar à onde complète ». Après un rappel de l'historique des applications lidar à la forêt et des principaux résultats

présents dans la littérature scientifique internationale, je présenterai les principales variables intervenant dans l'équation lidar et qui seront utilisées par la suite. Les méthodes de traitement du signal développées durant cette thèse seront également détaillées dans ce chapitre. Elles seront partiellement reprises dans les articles scientifiques présentés dans les chapitres suivants. Les expériences aéroportées que j'ai utilisées, et auxquelles j'ai participées, seront ensuite détaillées avec leurs objectifs scientifiques propres. Pour finir ce chapitre, je présenterai en détail le simulateur spatial dit « End-to-End » que j'ai développé afin de conduire l'étude de bilan de liaison nécessaire à la préparation d'une mission spatiale embarquant un système lidar dédié à la mesure des structures forestières.

Le chapitre 3 repose sur un article publié dans la revue internationale à comité de lecture « Forests ». J'y présenterai les évaluations des paramètres forestiers structuraux et de la quantité de biomasse aérienne forestière pour une forêt de type « Fontainebleau ». Ce travail sera associé à un bilan poussé des sources d'incertitudes qui sont généralement peu documentées dans la littérature scientifique jusqu'ici. Il sera complété par des premiers résultats sur le LAI (Leaf Area Index) et la classification de couverts forestiers.

Les travaux présentés dans le chapitre 3 s'appuient sur des mesures lidar effectuées en forêt de moyenne latitude. Le chapitre 4 est plus spécifiquement consacré à une extension vers les forêts tropicales. Il repose sur des mesures innovantes récentes collectées lors d'une expérience aéroportée à l'île de la Réunion en mai 2014. Il est construit autour d'un article soumis. Différents types de couverts forestiers tropicaux sont comparés au regard de la mesure lidar aéroportée. Les paramètres forestiers, dont la hauteur de la canopée, sont confrontés à des mesures de terrain effectuées simultanément par les équipes sur place.

Le bilan de liaison pour un système lidar embarqué sur une plateforme spatiale sera ensuite présenté dans le chapitre 5. Ce chapitre est également construit autour d'un article publié dans la revue internationale à comité de lecture « Remote Sensing ». Les effets de pente, de diffusion multiple et l'importance du choix de la divergence laser et de la longueur d'onde seront discutés. Différentes configurations de plateforme sont également étudiées pour diverses orbitographies réalistes.

Pour finir, je donnerai dans le chapitre 6 mes principales conclusions et les perspectives nombreuses de mon travail de recherche.

2 Lidar canopée : Historique et notions théoriques

2.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation du système lidar canopée. On y abordera le principe de la mesure lidar au regard de ses applications à l'étude du milieu forestier. Il est également le chapitre de présentation des outils théoriques qui seront utilisés au-cours de cette thèse. Les différents paramètres forestiers accessibles à la mesure lidar seront identifiés et je montrerai comment les retrouver à partir de l'équation lidar. La méthode utilisée pour établir le bilan d'erreur pour un système embarqué sur avion ou satellite sera également détaillé.

Dans la partie 2.2, après une introduction sur ce qu'est un système lidar et un rappel de l'histoire des applications lidar pour l'étude des forêts, le système lidar ULICE, qui a été l'instrument utilisé le long de cette thèse, sera présenté. Cette partie s'appuiera sur les principaux résultats présents dans la littérature scientifique internationale. La théorie de la mesure pour un système lidar canopée sera ensuite détaillée dans la partie 2.3. Premièrement, la modélisation directe est présentée en discutant les différentes composantes de l'équation lidar, ainsi que les sources de bruit. Deuxièmement, les approches de modélisation inverse utilisées durant cette thèse seront exposées. Les paramètres forestiers déduits de ces approches seront ensuite définis. Pour finir, une approche semi-empirique permettant l'évaluation du bilan de liaison du lidar pour une mission spatiale sera exposée. Cette modélisation utilise le couplage entre les mesures effectuées au-dessus de différents sites forestiers et un modèle direct/inverse que l'on nommera également « modèle end-to-end ». Le simulateur lidar spatial que j'ai développé sera présenté dans le détail. Les expériences aéroportées que j'ai utilisées pour construire la base de données de référence seront ensuite résumées.

2.2. L'instrument lidar

2.2.1. Définitions du lidar en générale et lidar canopée

Le lidar, acronyme de « LIght Detection And Ranging » (en français « détection et télémétrie par ondes lumineuses »), est un instrument de télédétection active qui mesure le temps aller-retour d'impulsion lumineuse laser lors de leur déplacement entre le capteur et la cible. Il fonctionne sur le même principe que le RADAR (Radio Detection And Ranging) ou le SODAR (SOund Detection And Ranging), mais il utilise pour l'émission une onde électromagnétique (laser) de l'ultraviolet à l'infrarouge. Le lidar peut se décomposer en 3 parties : le module d'émission, le module de réception et la chaîne électronique d'acquisition.

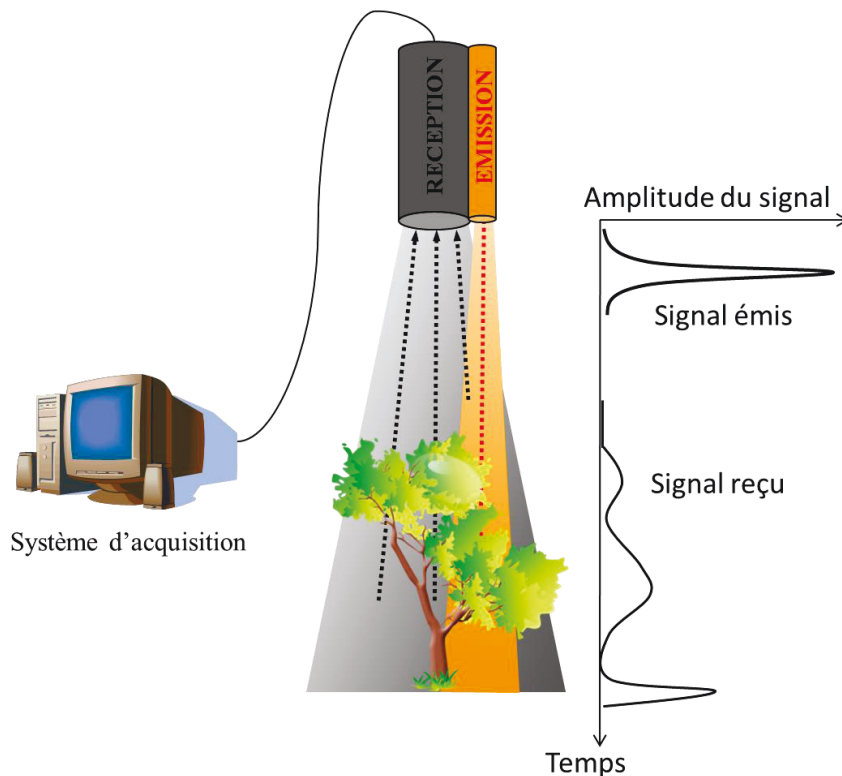


Figure 2.1. Principe de la mesure lidar pour la forêt.

Un lidar canopée est particulièrement adapté à la mesure de la structure en 3 dimensions de la forêt. Son principe est basé sur le même principe que celui d'un système lidar dédié à l'étude du système atmosphérique (Chazette et al., 2014). Le schéma de principe de la mesure lidar canopée est donné dans la Figure 2.1. Une impulsion laser est envoyée vers des cibles (la forêt), qui ensuite est diffusée par la canopée (branches, feuilles) et également par les surfaces. Donc, une partie seulement des photons est rétrodiffusée vers l'instrument et ensuite collectée à l'aide d'un télescope ou d'un système de lentilles. Le flux lumineux est ensuite focalisé sur un photomultiplicateur ou une photodiode à avalanche (en fonction de la longueur d'onde utilisée) où il est converti en courant ou tension, pour être numérisé et enregistré grâce à une chaîne électronique d'acquisition. L'échantillonnage temporel du signal par le système d'acquisition est défini par la largeur temporelle de l'émission laser et la fréquence d'échantillonnage de l'analyseur (on parle également de porte temporelle en comptage de photons). La somme de ces deux contributions définit la résolution du lidar le long de la ligne de visée de l'instrument.

2.2.2. Lidar pour les applications forestières

Les systèmes lidar pour les applications forestières sont classés selon les caractéristiques suivantes :

- Ils enregistrent la distance de la première et/ou la dernière réponse rétrodiffusée ou le signal entier de retour.
- Ils ont une petite empreinte du laser au sol (typiquement de l'ordre de quelques centimètres) ou une grande empreinte du laser au sol (du mètre à des dizaines de mètres). On parle d'empreinte moyenne pour des diamètres de la tâche au sol de quelques mètres.
- Ils travaillent avec des fréquences de balayage allant de quelques dizaines d'Hertz à des dizaines de milliers, et ils peuvent être animés d'un balayage.

Presque tous les systèmes lidar commerciaux (e.g. <http://www.optech.com/> ; <http://www.leica-geosystems.com/en/index.htm>) ont des petites empreintes du laser au sol (5-30 cm de diamètre), et des fréquences d'échantillonnage hautes (1 000-10 000 Hz). Ils enregistrent la première réponse rétrodiffusée (représentative de la surface réfléchissante la plus proche de l'instrument), et parfois la dernière réponse rétrodiffusée (représente de la surface réfléchissante la plus loin de l'instrument), mais ils n'offrent pas un profil vertical complet.

Un système lidar avec une petite empreinte n'est pas un bon choix pour restituer les structures verticales de la forêt. D'abord, les bords de la couronne des arbres sont souvent sur-échantillonnés au lieu du sommet (Nelson, 1997). Deuxièmement, une grande densité de points est nécessaire pour bien échantillonner un site et il faut souvent des vols répétitifs. En général, une densité de l'ordre de 3 à 4 points par mètre carré est obtenue. Ensuite, ce n'est pas évident d'être certain que le faisceau laser a pénétré jusqu'au sol sauf pour des forêts « bien espacées » comme c'est le cas des plantations ou des sites entretenus.

Un système lidar avec une moyenne ou grande empreinte a beaucoup d'avantages pour résoudre ce genre de problème (Blair et al., 1999). Les biais liés à la mauvaise détection du sommet des arbres peuvent être réduits. La densité des vols peut ainsi être déduite, surtout s'il s'agit d'étudier de manière statistique des sites forestiers. En plus, ce type de système permet d'enregistrer le signal de retour dans son ensemble avec une résolution verticale élevée (quelques centimètres à ~1 m), afin de fournir les structures verticales de la canopée du sol au sommet des arbres. Des études utilisant ces systèmes lidar aéroportés ont montré l'efficacité de cette technologie (i.e. une moyenne ou grande empreinte) dans les applications forestières (Allouis et al., 2011; Cuesta et al., 2010; Drake et al., 2002a; Dubayah et al., 2010).

Une illustration de la mesure lidar sur des sites forestiers avec différentes empreintes du laser au sol est donnée dans la Figure 2.2. De gauche à droite, on y voit les mesures du lidar aéroporté scannant à petite empreinte (type ALS, (Höfle et al., 2012)), du lidar aéroporté avec une moyenne empreinte (type ULICE, (Shang and Chazette, 2014)), et du lidar spatial avec une grande empreinte (type GLAS, (Ballhorn et al., 2011; Hayashi et al., 2013)).

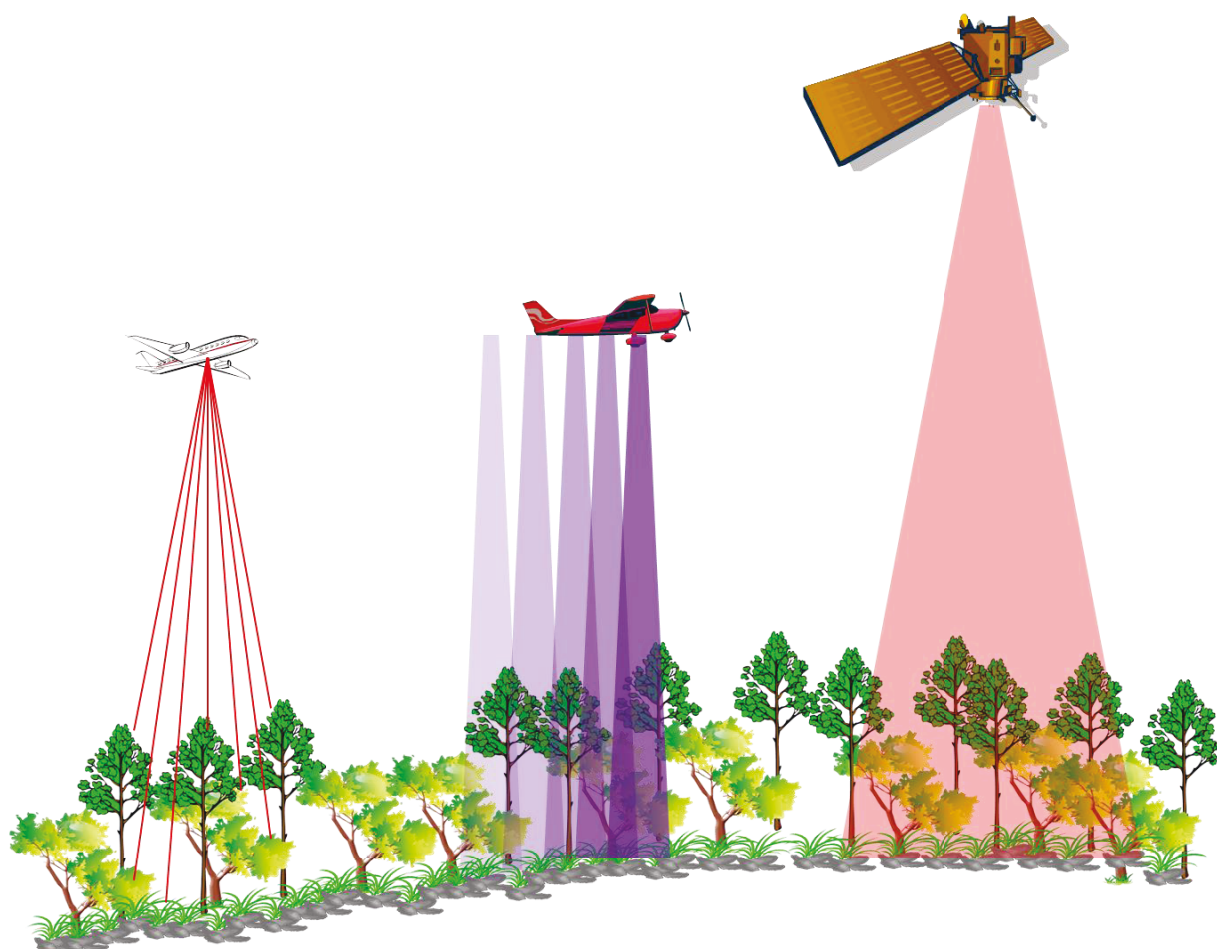


Figure 2.2. Illustration de la mesure lidar avec différentes empreintes du laser au sol.

2.2.3. Du passé vers l'actuel

Les premiers lidars apparus dans les années 60 sont des applications directes des premiers lasers Q-switched (« light amplification by stimulated emission of radiation » ou en français « amplification de la lumière par émission stimulée du rayonnement »). Le premier lidar, construit en Italie, a permis de mesurer la distance entre la Terre et la Lune (Smullin and Fiocco, 1962). Ce type de système a été embarqué sur Apollo 15, 16, et 17 pour les missions sur la lune dans les années 1970 (Kaula et al., 1974). Bien évidemment, il n'y avait pas de forêt sur la Lune.

Dans des années 1980, les premiers systèmes lidar dédiés aux applications forestières sont mis en œuvre. Krabill and Collins (1984) utilisent un système dit « Airborne Oceanographic Lidar (AOL) », dédié d'origine aux applications marines, pour évaluer la capacité de pénétration du laser dans le couvert forestier afin de détecter le niveau du sol. Après avoir effectué des mesures lidar aéroportées pendant l'hiver et l'été, pour des forêts de résineux et de feuillus, ils ont trouvé que la restitution du niveau du sol par les mesures lidar était encourageante, avec une erreur de ~50 cm. Par ailleurs, Schreier *et al.* (1985) ont montré que leur lidar aéroporté qui utilisait la longueur d'onde de 904 nm, dans le proche infrarouge, permettait de reproduire les niveaux du sol et de la canopée pour les forêts ouvertes. La première étude qui a réussi l'estimation du volume et de la biomasse des forêts à partir de la mesure lidar a été conduite par Nelson *et al.* (1988). Ils utilisaient un lidar aéroporté émettant à la longueur d'onde de 532 nm avec une petite empreinte du laser au sol (~0.75 m pour des vols à 150 m au-dessus de la surface (agl)). En même temps, le premier système lidar à onde complète a été conçu

pour les études bathymétriques (Guenther and Mesick, 1988). Le terme à « onde complète » fait référence à un « véritable » profileur comme ceux couramment utilisés en physique de l'atmosphère.

Dans des années 1990, le technique lidar a fait des progrès importants, surtout sur les sources lasers et la miniaturisation des électroniques. Ceci a conduit à plusieurs capteurs spatiaux fiables et précis. Par exemple, le Shuttle Laser Altimeter (SLA) (Garvin et al., 1998) et le Mars Observer Laser Altimeter (MOLA) (Smith, 1998) ont effectué des mesures de la topographie de la Terre et de Mars. Plusieurs lidar aéroportés ont été mis en œuvre, comme l'Airborne Topographic Laser Altimeter System (ATLAS) (Bufton, 1991) et le Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery (SLICER) (Blair et al., 1994). L'évolution des systèmes lidar aéroportés est importante, elle a permis des études de plus en plus détaillées sur la structure en trois dimensions des forêts, telles les hauteurs d'arbre et de la distribution verticale du matériel végétal (Lefsky et al., 1999a; Means et al., 2000). A ceci s'ajoute que depuis plus de 10 ans, aux échelles régionales, des évaluations utilisant des systèmes lidar embarqués sur avions ont permis de réaliser des cartographies de la structure tridimensionnelle de certaines forêts et d'en déduire les quantités de biomasse et de carbone stocké (Asner et al., 2010; Nelson et al., 2003).

Le lancement en 2003 du satellite ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) a permis quant à lui d'obtenir des signaux lidars à partir du système lidar GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) sur l'ensemble du globe. Ce dernier a fourni des mesures de la structure verticale et de la biomasse de différentes régions forestières du globe (Boudreau et al., 2008; Brenner et al., 2003; Harding and Carabajal, 2005; Lefsky et al., 2005; Lim et al., 2003; Rosette et al., 2008; Schutz et al., 2005). Une mission lidar spatial, Vegetation Canopy Lidar (VCL) Mission, dédié aux études des forêts, avait planifié d'être lancé sur satellite. Mais elle a été annulée à cause de problèmes techniques. Néanmoins, beaucoup d'études intéressantes ont été effectuées autour d'un système lidar aéroporté appelé le Laser Vegetation Imaging Sensor (LVIS), qui est basé sur le concept VCL. On peut citer par exemple, les applications du LVIS pour la cartographie de la végétation et la topographie (Blair et al., 1999; Hofton et al., 2002), la restitution de la hauteur d'arbre et de la biomasse (Drake et al., 2002b; Dubayah et al., 2010), et l'estimation du LAI (leaf area index) (Tang et al., 2012).

Récemment, le Global Ecosystems Dynamics Investigation (GEDI) Lidar a été sélectionné par la NASA pour effectuer des mesures des structures verticales et de la biomasse de la forêt à l'échelle globale. Il s'agit d'un lidar multifaisceaux qui doit être implanté sur la station internationale (International Space Station (ISS)) en 2019 dans un module japonais. On notera que même si la France a fait diverses propositions pour embarquer un lidar sur l'ISS, dont la dernière durant ma thèse lors du dernier appel à idée de l'agence spatiale européenne (ESA), aucune réponse n'a été retournée. Nous avons néanmoins poursuivi les études en utilisant le démonstrateur aéroporté qui a été développé au LSCE ces dernières années.

2.2.4. Le démonstrateur ULICE

Le système ULICE (Ultraviolet Lidar for Canopy Experiment) a été développé au LSCE et mis en opération avec le soutien du CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), suite au système lidar LAUVAC (Lidar Aéroporté Ultra-Violet pour l'Atmosphère et la Canopée forestière) qui est le premier prototype du lidar canopée dans le domaine ultra-violet. LAUVAC est un système qui est issu des lidar atmosphériques précédemment développés au LSCE et qui ont permis la création de la société Leosphere™ (<http://www.leosphere.com>). Ce système lidar compact a donc été adapté pour

mesurer les structures verticales de plantations de pins maritimes dans la forêt des Landes (Cuesta et al., 2010). Il était néanmoins limité quant à sa résolution verticale et les possibilités de contrôle de la taille de la tâche laser au sol.

Le système ULICE est un système lidar à onde complète dédié aux études des forêts. Il se doit d'être un démonstrateur pour aider à la simulation de l'observation spatiale. Une mission lidar potentielle est en effet envisagée en France pour étudier la forêt à l'échelle globale. Les caractéristiques principales du lidar ULICE sont rassemblées dans le Tableau 2.1, et un schéma de sa tête optique est donné sur la Figure 2.3.

	Caractéristiques	ULICE	
		typique	tropical
Emission	Longueur d'onde	355 nm	
	Energie par impulsion	~7 mJ	
	Durée d'impulsion	~6 ns	
	Fréquence de répétition (PRF)	1–100 Hz	
	Diamètre du faisceau	20 mm	
Réception	Divergence du faisceau maximum	9 mrad	40 mrad
	Diamètre de télescope	150 mm	
	Densité optique (DO)	ajustable	
	largeur de bande du filtre	0.3 nm	10 nm
	Champ de vue totale	~5 mrad	33 mrad
	Detector	Photomultiplicateur	
	Mode détection	Analogique	
Acquisition	Fréquence d'échantillonnage	100-500 MHz	
Global	Poids de la tête optique	~20 kg	
	Poids de l'électronique	~15 kg	
	Alimentation électrique	2 batteries de 12V, ~400 W	

Tableau 2.1. Caractéristiques principales du système lidar ULICE (Ultraviolet Lidar for Canopy Experiment)

2.2.4.1. Choix de la longueur d'onde

Les lidars canopée ou topographiques utilisent généralement des longueurs d'onde dans le proche infrarouge, par exemple à 1064 nm, qui est la longueur d'onde d'émission fondamentale des lasers Nd:YAG (grenat d'yttrium aluminium dopé au néodyme). La végétation possède dans ce domaine une transmittance et une réflectance importantes (Asner, 1998). Mais en même temps, ces longueurs d'onde sont fortement diffusées par la végétation, ce qui conduit à des processus de diffusion multiple importants. Effectivement, la diffusion multiple peut introduire une distorsion sur le profil vertical lidar et elle peut rendre plus difficile son utilisation en biaisant la localisation de la surface sous le couvert forestier ou la position de la couronne des arbres. Cet aspect sera discuté dans les chapitres ultérieurs.

Il est possible pour le lidar d'émettre des photons ayant la moitié de la longueur d'onde des photons initiaux (seconde harmonique) grâce à un cristal non linéaire afin d'obtenir des lidars émettant dans le vert (532 nm), comme ceux utilisés pour la bathymétrie ou les premiers lidars canopée (Nelson et al., 1988). Mais c'est très difficile d'obtenir une énergie forte sous la condition de sécurité oculaire avec

une telle longueur d'onde. Ceci limite grandement leur utilisation, surtout à partir de moyens aéroportés.

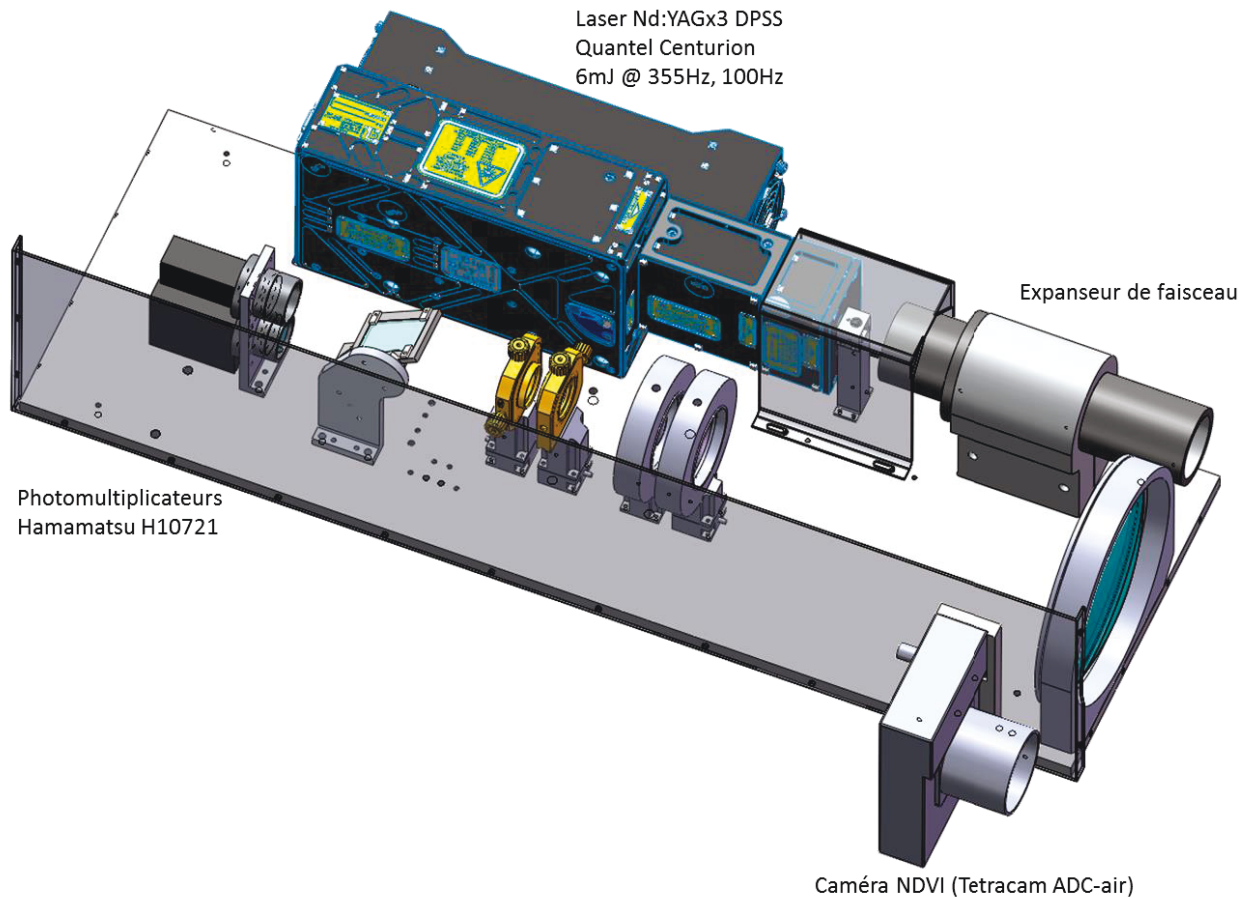


Figure 2.3. Schéma 3D de la tête optique du démonstrateur lidar ULICE (Ultraviolet Lidar for Canopy Experiment). Il s'agit ici de la dernière version utilisée au-dessus des forêts tropicales (des détails des éléments seront présentés dans le chapitre 4, section 2.1). On peut noter la présence d'une caméra NDVI montée de manière solide avec la tête optique lidar.

L'utilisation d'une longueur d'onde UV, qui est bien moins diffusée par la végétation, permet de résoudre la difficulté de la diffusion multiple. La longueur d'onde à 355 nm, comme celle utilisée pour la mesure des concentrations d'aérosols dans l'atmosphère (Chazette et al., 2007), est facilement disponible avec des lasers commerciaux suite au triplement de la longueur d'onde fondamentale initialement sélectionnée via un barreau de Nd:YAG. Elle est plus diffusée dans l'atmosphère que les longueurs d'onde infrarouge, ce qui peut en diminuer son intérêt pour des observations spatiales. Il est donc important de bien évaluer les avantages et désavantages de l'utilisation de l'UV pour l'étude des systèmes forestiers à partir d'avion et/ou d'une plateforme spatiale.

Dans notre système, la longueur d'onde à 355 nm est choisie pour effectuer l'ensemble des mesures aéroportées conduites lors de nos campagnes au-dessus de divers sites forestiers.

2.2.4.2. Emission

Le lidar ULICE fonctionne donc dans des conditions de sécurité oculaire dès l'émission au niveau de la tête optique (Il a une Distance Nominale de Risque Oculaire nulle selon la norme NF EN 60825-1). Il utilise un laser Centurion (un laser Nd:YAG solide pompé par diodes) fabriqué par la société

Quantel™ (<http://quantel-laser.com/>). L'énergie par impulsion est surdimensionnée (~ 7 mJ), elle est compensée par des densités optiques à la réception. On conservera donc un signal utile important en diminuant fortement la contribution de la luminance du ciel qui vient diminuer le rapport signal à bruit du lidar.

Le choix de la fréquence de répétition (pulse repetition frequency (PRF) en anglais) dépend de la densité de points nécessaires à l'échantillonnage des parcelles forestière et de la taille d'empreinte au sol choisie. Pour le système lidar ULICE, elle va de 5 à 100 Hz.

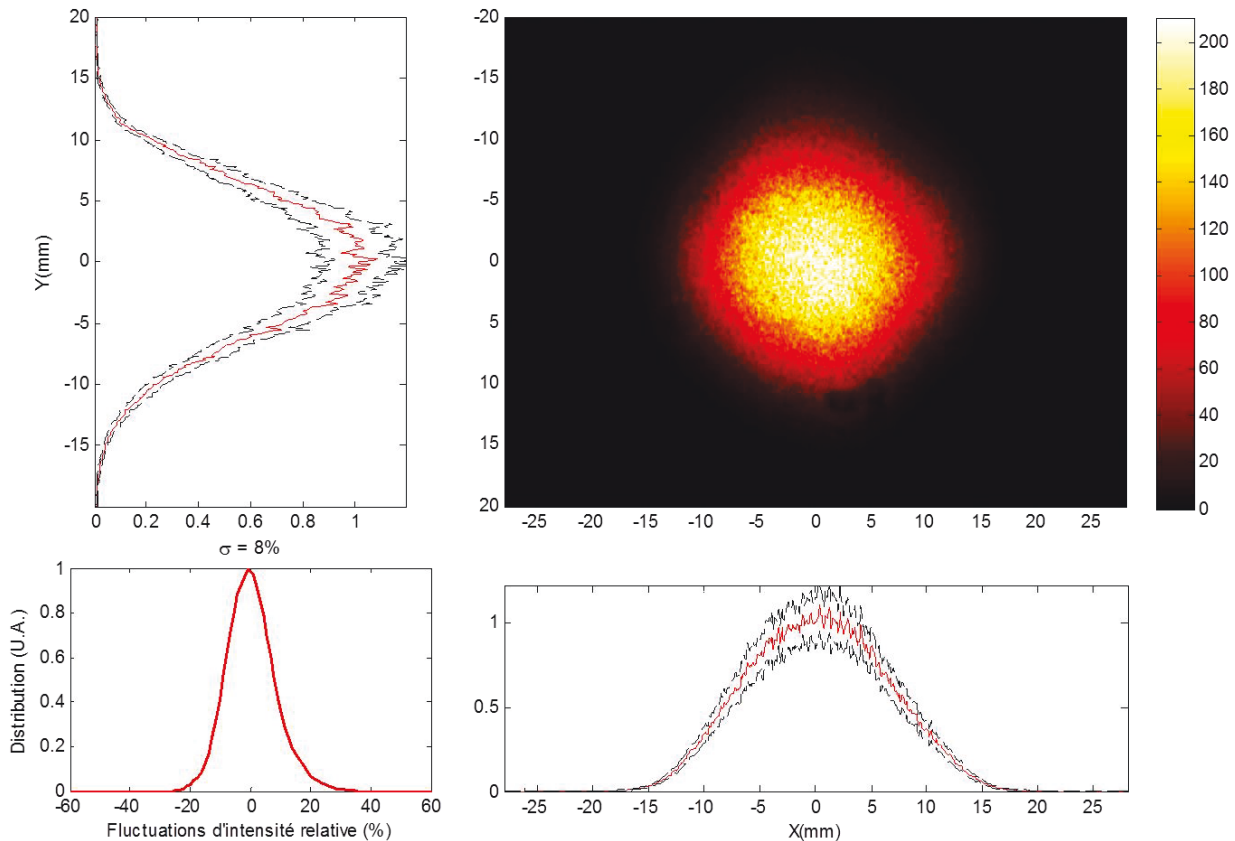


Figure 2.4. Distribution de l'énergie dans la tâche du faisceau laser avec une fréquence de répétition de 100 Hz. X et Y représentent la distance par rapport au centre de la tâche. Les couleurs représentent l'intensité du laser (W/m^2) de manière relative, car on s'intéresse aux valeurs relatives et l'étalonnage n'a pas été fait.

L'énergie laser n'est pas répartie de manière homogène dans la tâche au sol. Après l'étalonnage sur banc optique en laboratoire, la distribution de l'énergie laser a été trouvée comme étant d'une forme quasi gaussienne, comme le montre la Figure 2.4 pour le cas d'une fréquence de répétition de tir égale à 100 Hz. Avec une fréquence de répétition plus basse, la forme d'onde sera moins gaussienne et le lidar ne fonctionnera pas dans sa configuration optimale définie par le constructeur. Pour des mesures aéroportées avec des empreintes laser au sol réduites (< 5 m), nous ne considérerons pas la répartition de l'énergie dans la tâche laser. Mais il faut la prendre en compte afin de définir un instrument spatial avec une plus grande empreinte (quelques dizaines de mètres).

La divergence du faisceau laser permet de définir la tâche au sol du laser en considérant la distance entre le lidar et la cible. Sa valeur maximum est ~ 9 mrad avec un afocal dédié aux études atmosphériques. Pour avoir une plus grande tâche au sol du laser, nous avons changé l'afocal afin d'avoir un extenseur de faisceau avec une divergence allant de 0 à 40 mrad. Nous reviendrons sur cet aspect au cours du chapitre 4.

2.2.4.3. Réception

Le module de réception comprend (comme cela est montré sur la Figure 2.3 en allant de droite à gauche) : un télescope de 150 mm de diamètre, des lentilles, des polka-dots (ou des lames de Brewster en fonction de l'application) pour séparer le faisceau en 2 voies de réception. A la fin de chaque voie de réception, il y a un filtre interférentiel, des densités optiques et un photo-multiplicateur Hamamatsu™ (<http://hamamatsu.com/>).

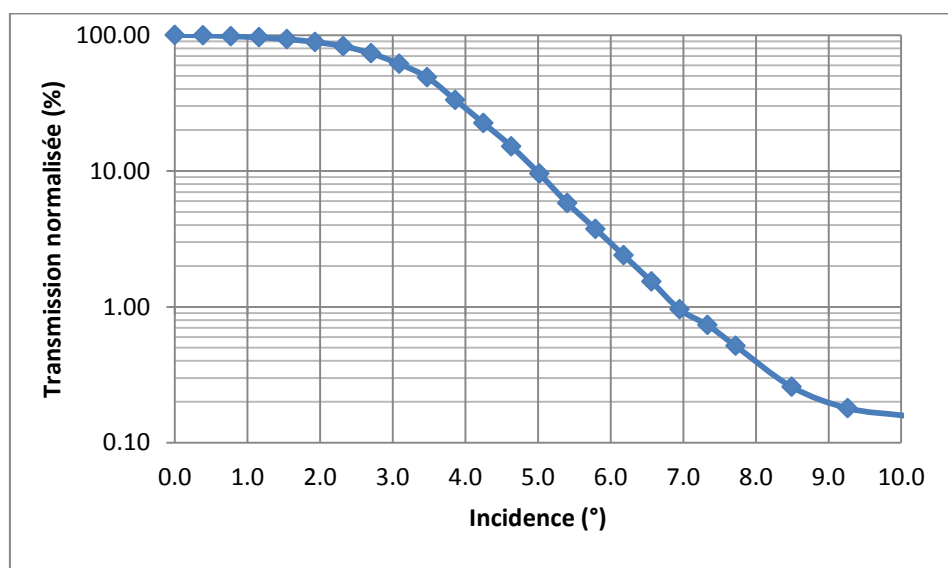


Figure 2.5. Transmission en fonction de l'angle d'incident pour le filtre interférentiel à $354.7 \text{ nm} \pm 0.15 \text{ nm}$ (Materion™)

L'utilisation d'un filtre interférentiel à bande étroite, qui correspond à un petit champ de vu, est également importante afin de limiter la lumière parasite du fond de ciel à la détection. Mais, il y a un compromis à trouver en fonction de la divergence du faisceau laser. Dans un premier temps, le lidar ULICE a effectué des mesures avec une petite empreinte laser ($< 5 \text{ m}$). Des tests sur le terrain nous ont alors conduit à considérer une largeur de bande de $0.2\text{-}0.3 \text{ nm}$, comme cela est le cas pour le lidar atmosphérique (Chazette et al., 2012). Un filtre interférentiel (Materion™) à $354.7 \text{ nm} \pm 0.15 \text{ nm}$ a été utilisé, ses performances sont données sur la Figure 2.5. Il accepte des angles incidences de 2° (35 mrad), ce qui correspond au champ de vue $\sim 5 \text{ mrad}$ en raison de l'effet d'agrandissement (à l'ordre de $\times 15$) sur le voie de réception. Dans un deuxième temps, nous avons augmenté la taille d'empreinte du laser au sol pour effectuer des mesures sur les forêts tropicales. Le lidar ULICE a donc été équipé d'un filtre interférentiel (Thorlabs™) avec une largeur de bande de 10 nm (i.e. $354.7 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$) pour avoir un champ de vue jusqu'à $\sim 36 \text{ mrad}$. Plus de détails seront présentés dans le chapitre 4.

2.2.4.4. Chaîne d'acquisition

La chaîne d'acquisition a été développée à partir de matériels National Instruments™ (<http://france.ni.com/>). Ce système est constitué d'un ordinateur PXI, comprenant un contrôleur (avec

processeur, mémoire RAM, système d'exploitation localisé, divers ports E/S) et une carte d'acquisition. Un logiciel d'acquisition a été développé en langage de programmation LabVIEW, pour permettre un pilotage complet du système d'acquisition et du lidar.

Pour ce qui est de la résolution verticale, celle-ci dépend de la fréquence d'échantillonnage de la carte d'acquisition et de la durée d'impulsion du laser. Le laser que nous avons en disponibilité était d'une durée d'impulsion comprise entre 6 et 7 ns, nous avons donc choisi une fréquence d'échantillonnage conduisant à une résolution verticale du lidar compatible (0.3-1.5 m), c'est-à-dire entre 100 et 500 MHz.

2.3. Théorie

2.3.1. Modélisation directe

Dans cette partie nous allons donner l'expression de l'équation lidar utilisée en expliquant ce que sont chacun des termes qui y contribuent. Les différents bruits sur le signal lidar pouvant intervenir de manière significative dans notre étude seront également présentés.

Pour un système lidar rétrodiffusion embarqué sur aéronef ou plateforme spatiale, le signal S (unité en Volt ou nombre de photon) pour des mesures prises à une altitude h dans la forêt s'exprime sous la forme (Measures, 1984) :

$$S(\lambda, h, Z_p) = K(\lambda) \cdot \frac{1}{(Z_p - h)^2} \cdot \beta(\lambda, h) \cdot \exp[-2\Gamma(\lambda, h)] \quad 2.1$$

Où Z_p est l'altitude de l'instrument, K est la constante instrumentale, β est le coefficient de rétrodiffusion, et Γ est l'épaisseur optique totale (dans le sens de l'équation lidar) entre l'instrument et l'altitude du diffuseur.

2.3.1.1. Paramètres instrumentaux

Il y a 2 modes de détection : comptage de photons et analogique. Le mode comptage de photons permet de mesurer individuellement les photons reçus sur le photomultiplicateur. Mais, si nombre de photons reçus par unité de temps est trop important, ce mode se trouve saturé et il devient préférable de travailler en mode analogique. Dans ce mode, le courant moyen en sortie du détecteur est échantillonné avec une fréquence accessible à la carte d'acquisition utilisée.

La constante instrumentale $K(\lambda)$ regroupe tous les paramètres systèmes (Chazette, 1990) :

$$K(\lambda) = \begin{cases} E_0 \cdot \frac{\lambda}{hc} \cdot QE \cdot OE \cdot A \cdot \Delta z & [\text{nombre}] \text{ en mode comptage de photons} \\ E_0 \cdot OE \cdot A \cdot G \cdot R_c \cdot \frac{c}{2} & [V] \text{ en mode analogique} \end{cases} \quad 2.2$$

où OE et QE sont le rendement optique du lidar et le rendement quantique des détecteurs, A est la surface du récepteur (e.g. télescope), E_0 est l'énergie d'émission du laser, G est le gain du système (y compris les gains de l'étage de pré-amplification et des photomultiplicateurs (en $A \cdot W^{-1}$)), R_c est la

résistance de charge, \hbar est la constante de Planck ($\sim 6.62 \times 10^{-34}$ J·s), c est la célérité de la lumière ($\sim 3 \times 10^8$ m·s⁻¹), et Δz est la résolution du lidar le long de la ligne de visée (en m).

2.3.1.2. Propriétés optiques du milieu diffusant

Le coefficient d'extinction α traduit l'atténuation du signal par absorption ou diffusion le long du trajet du faisceau laser. Pour une mesure dans le milieu forestier à partir d'un système lidar aéroporté ou spatial, il faut prendre en compte que les molécules de l'air, les aérosols et les nuages peuvent aussi atténuer le signal entre l'émetteur et la canopée.

L'épaisseur optique Γ à la longueur d'onde λ est définie comme l'intégrale du coefficient d'extinction entre 2 altitudes. L'épaisseur optique totale $\Gamma(\lambda, h)$ à une hauteur h à partir d'une plateforme Z_p s'exprime sous la forme intégrale :

$$\begin{cases} \Gamma(\lambda, h) = \int_h^{Z_p} \alpha_{total}(z) \cdot dz \\ \Gamma(\lambda, h) = \Gamma_{atmosphere}(\lambda, h) + \Gamma_{foret}(\lambda, h) \cdot \eta(\lambda, h) \end{cases} \quad 2.3$$

où

$$\alpha_{total} = \alpha_{aérosol} + \alpha_{molécule} + \alpha_{nuage} + \alpha_{forêt} \quad 2.4$$

Ici, on considère que la forêt est un milieu diffusant, dont l'épaisseur optique apparente de la forêt Γ_{foret} apparaît 2 fois pour l'aller-retour du faisceau laser.

Le coefficient de la diffusion multiple η représente la contribution de la diffusion multiple forestière au signal lidar (Berthier et al., 2006). Aux profondeurs différentes dans la couche de diffusion, il peut être déduit à partir du rapport entre le signal lidar total S (y compris la diffusion simple et multiple S_{mc}) et le signal en diffusion simple ($S - S_{mc}$) :

$$\eta(h) = 1 - \frac{\ln\left(\frac{S(h)}{S(h) - S_{mc}(h)}\right)}{2(\Gamma_{foret}(h) - \Gamma_{foret}(h_t))} \quad 2.5$$

où h_t est l'altitude du sommet de la couche de diffusion.

La transmission T entre les 2 altitudes Z_p et h est définie par :

$$T(\lambda; Z_p, h) = \exp(-2\Gamma(\lambda, h)) \quad 2.6$$

Le coefficient de rétrodiffusion β traduit la part du signal incident diffusée à 180° au cours de l'interaction entre l'impulsion laser et les diffuseurs présents le long du trajet. Le rapport de la rétrodiffusion (resp. l'extinction) sur l'extinction (resp. sur la rétrodiffusion) définit le *BER* ou « Backscatter-to-Extinction Ratio » en anglais (resp. le rapport lidar ou « Lidar Ratio » *LR* en anglais) :

$$BER(\lambda, h) = \frac{\beta(\lambda, h)}{\alpha(\lambda, h)} = \frac{1}{LR(\lambda, h)} \quad 2.7$$

Il dépend uniquement des propriétés microphysiques des diffuseurs et de la longueur d'onde considérée. Il peut être également interprété comme la probabilité pour qu'un photon du faisceau laser soit rétrodiffusé après son interaction avec les matériaux de la forêt.

2.3.1.3. Sources de bruit

Il est important de pouvoir quantifier la contribution de chaque source de bruit afin de déterminer quels sont les paramètres importants pour l'amélioration du rapport signal à bruit, « Signal to Noise Ratio » (SNR) en anglais.

Il y a principalement 5 sources de bruit distinctes et indépendantes : le bruit de rayonnement de fond, le bruit de grenaille (N_S), le bruit d'obscurité (N_D), le bruit de Nyquist-Johnson (N_{JN}), et le bruit de quantification. Chacun d'eux est associé à un écart-types exprimées par le symbole σ . On considère ici que le bruit de quantification basé sur 12 bits est négligeable lorsque l'on compare avec les autres sources de bruit. Le bruit de rayonnement de fond est également négligeable dans notre étude, car une grande densité optique a été utilisée pour les mesures aéroportées pour compenser un grand champ de vision.

Etant donné que le bruit est exprimé sous la forme d'un courant, le SNR s'écrit (Measures, 1984) :

$$SNR = \frac{S/R_c}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_D^2 + \sigma_{JN}^2}} \quad 2.8$$

où R_c est la résistance de charge.

En mode analogique, les écart-types des bruits (en Volt) sont donnés par (Measures, 1984) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_S(\lambda, h) = \sqrt{\frac{G \cdot \frac{hc}{\lambda} \cdot \zeta \cdot c}{2 \cdot \Delta z \cdot QE \cdot R_c}} \cdot S(\lambda, h) \\ \sigma_D = G \cdot NEP \cdot \sqrt{\frac{c}{4 \cdot \Delta z}} \\ \sigma_{JN} = \sqrt{\frac{k_B \cdot T_K \cdot c}{R_c \cdot \Delta z}} \end{array} \right. \quad 2.9$$

où ζ est un facteur correctif fixé à ~ 1.5 pour un photomultiplicateur et prenant en compte les fluctuations du gain. NEP est la puissance équivalente de bruit du détecteur, k_B est la constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J K⁻¹), et T_K est la température du détecteur.

En mode comptage de photons, le bruit de Nyquist-Johnson (N_{JN}) n'intervient pas, et le bruit d'obscurité (N_D) est négligeable par rapport au nombre de photons (σ_D est $\sim 3.5 \times 10^4$ fois plus petit que σ_S pour notre système lidar aéroporté). Seul le bruit de grenaille (N_S) intervient avec un écart-type σ_S (en nombre de photon) :

$$\sigma_S(\lambda, h) = \sqrt{S(\lambda, h)} \quad 2.10$$

Le SNR en mode comptage de photons s'exprime donc :

$$SNR = \frac{S(\lambda, h)}{\sqrt{S(\lambda, h)}} \quad 2.11$$

2.3.2. Modélisation inverse

Pour déterminer la structure interne de la végétation, il faut détecter les pics d'intensité (les échos) au sein du profil lidar rétrodiffusé. En connaissant l'angle de visée du laser, ces pics nous renseignent sur la position en trois dimensions des obstacles rencontrés par l'onde laser. La difficulté est ici de distinguer les pics d'intensité parmi le bruit du signal. J'ai développé deux algorithmes, donc deux méthodes de détection de pics : une méthode du seuillage de l'intensité et une méthode dite « gaussienne ». A partir de ces méthodes, les paramètres forestiers peuvent être ensuite déduits à partir des profils lidar.

2.3.2.1. Algorithme : la méthode du seuillage de l'intensité

La méthode du seuillage de l'intensité consiste à extraire un écho dès qu'il dépasse un seuil préalablement fixé. C'est un algorithme simple, mais il faut distinguer la recherche de l'écho du sol qui s'effectue par rapport au niveau de bruit de signal sous la surface du sol, de celle de l'écho lié à la partie supérieure de la canopée qui se distingue par rapport au signal atmosphérique au-dessus de cette dernière. Un algorithme similaire a déjà été développé pour les nuages par Chazette *et al.* (2001) et appliqué au milieu forestier par Cuesta *et al.* (2010). J'ai sensiblement amélioré cet algorithme afin d'affiner la justification des différents seuils (Shang and Chazette, 2014), dont le principe détaillé sera présenté dans le chapitre 3. Un exemple de l'utilisation de cette méthode est donné dans la Figure 2.6 où on peut distinguer 4 parties principales sur le signal lidar : la réponse de l'atmosphère, la réponse du couvert forestier et de la surface, et le signal de bruit sous le niveau du sol. C'est un profil lidar avec une petite empreinte au sol (~ 2 m), qui fait apparaître que des pics sont séparés.

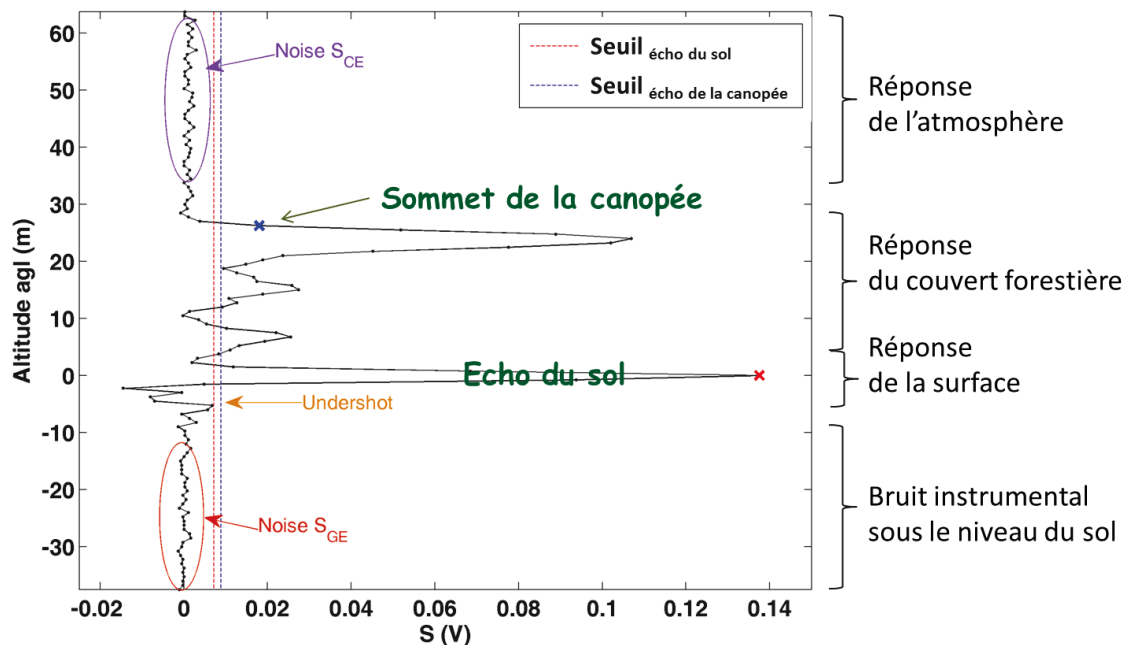


Figure 2.6. Exemple du profil lidar (avec une petite empreinte au sol, ~ 2 m) en utilisant la méthode du seuillage de l'intensité. (CE : écho de la canopée, GE : écho du sol)

2.3.2.2. Algorithme : la méthode gaussienne

La méthode gaussienne n'est pas détaillée dans les chapitres suivants. C'est pour cela que nous allons la décrire plus précisément. Elle est basée sur l'ajustement d'une famille de gaussienne selon Hofton *et al.* (2000) et adapté à nos études en améliorant son fonctionnement.

HYPOTHESE

D'abord, nous supposons que la forme de l'impulsion de sortie du laser est gaussienne, bien que ce ne soit pas toujours le cas (c.f. section 2.2.4.2). On suppose ensuite que l'impulsion laser de retour est composée d'une série de réflexions pouvant se chevaucher et qui ont des formes similaires que celles de l'impulsion de sortie du laser. On notera que la capacité de reproduire un profil lidar par cette méthode est limitée par la résolution verticale du lidar et la réponse impulsionnelle du détecteur. Elle est donc dépendante de la largeur de l'impulsion laser et de la fréquence d'échantillonnage du numériseur.

Nous voulons décomposer le profil lidar rétrodiffusé S en une famille d'onde gaussienne suivant la forme :

$$S = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \exp\left(\frac{-(x-m_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad 2.12$$

où $i = 1, \dots, n$, est l'indice de chaque onde gaussienne et n le nombre total de ces fonctions. a_i , m_i , et σ_i , sont l'amplitude, la position (l'espérance mathématique), et la demi-largeur (l'écart type) du chaque $i^{ème}$ onde gaussien.

LISSAGE

Les bruits vont générer des « fausses » ondes gaussiennes. S'il existe une onde de bruit sur la réponse de la canopée ou du sol, des incertitudes vont être ajoutées en créant des réponses gaussiennes parasites. Nous lissons donc la forme d'onde observée pour réduire le bruit à haute fréquence afin de minimiser son influence.

Le lissage est effectué par la convolution avec une gaussienne de référence ($G_{référence}$) dont demi-largeur est prédéterminée par le profil lidar observé. Le choix est basé sur la demi-largeur de la réponse impulsionnelle du système (par exemple, l'impulsion laser de retour sur une surface plane, comme le tarmac de l'aérodrome). Un exemple du lissage d'un profil lidar est donné sur la Figure 2.7a.

$$S_{conv}(k) = \sum_j S(j) \cdot G_{référence}(k - j + 1) \quad 2.13$$

INTERPOLATION (EN OPTION)

Selon la résolution verticale du profil lidar, on peut faire une interpolation pour augmenter la pseudo-résolution afin de diminuer le biais sur la position des ondes gaussiennes.

Dans la plupart de nos expériences, une résolution verticale de 0.75 m a été utilisée. Une telle résolution est trop faible pour bien localiser les ondes gaussiennes retrouvées. J'ai donc interpolé les profils pour avoir une pseudo-résolution de 0.375 m. Un exemple du profil interpolé est donné dans la Figure 2.7b, il est représenté par les points noirs qui sont deux fois plus nombreux que ceux de la Figure 2.7a.

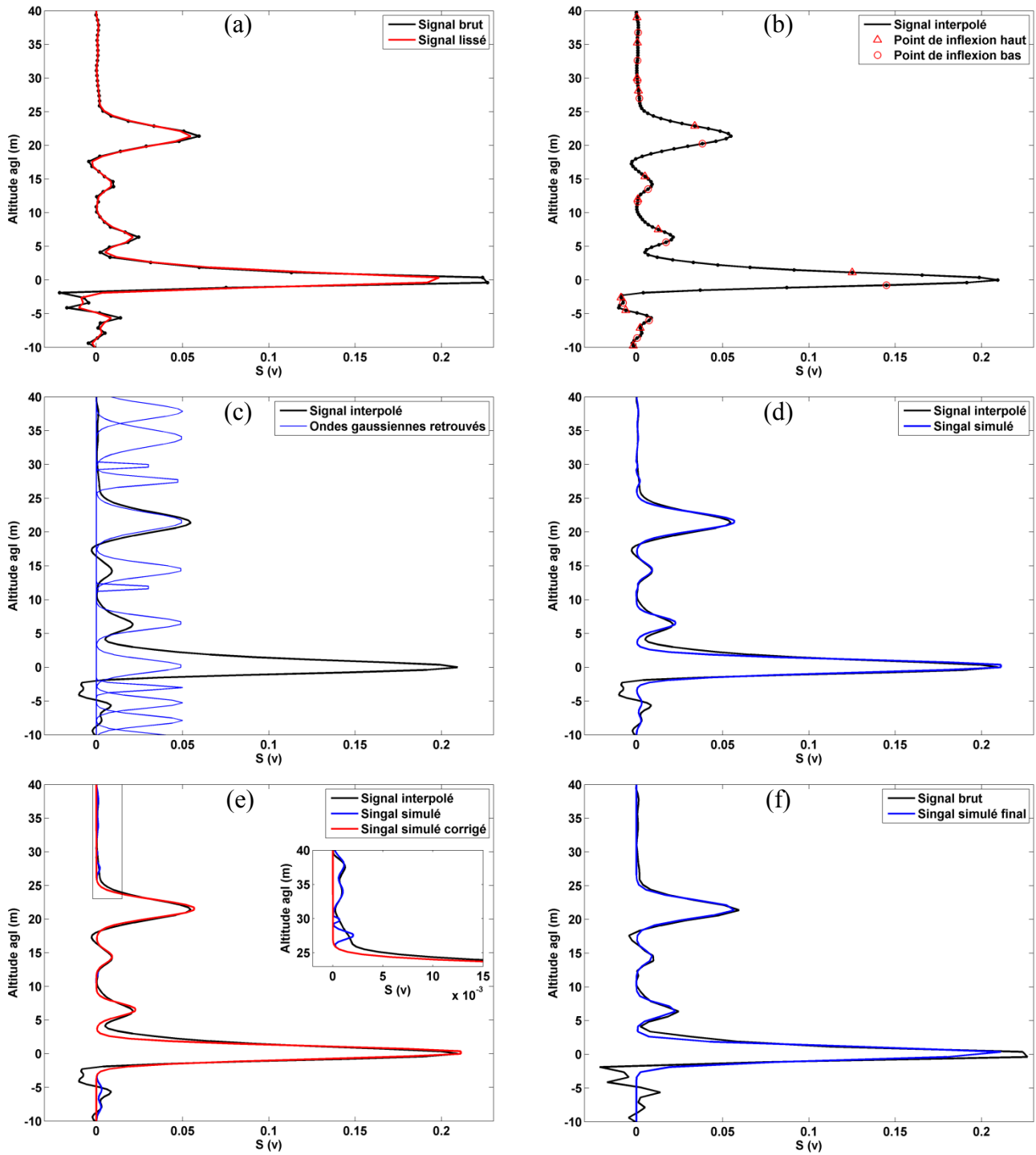


Figure 2.7. Illustration sur le déroulement de la méthode gaussienne. (a) Profil lissé (rouge) sur un profil lidar brut (noir). (b) Points d'inflexions d'altitude haute (triangle) et basse (cercle) retrouvés. (c) Ondes gaussiennes retrouvées avec une amplitude de 0.05. (d) Profil simulé (bleu) sur le profil original interpolé (noir). (e) Profil simulé corrigé (rouge) par rapport au profil simulé (bleu), la figure à l'intérieur est une partie zoomée des signaux. (f) Profil simulé final (bleu) et profil brut (noir), ici 4 formes d'ondes gaussiennes ajustées peuvent reproduire le profil lidar.

POINTS D'INFLEXION

Nous utilisons le fait qu'une onde gaussienne a deux points d'inflexion, et donc s'il y a n ondes gaussiennes dans un profil, il y aura $2n$ points d'inflexion. Le point d'inflexion i peut être trouvé par l'équation 2.14.

$$\frac{d}{dh_i} \left(\frac{ds}{dh_i} \right) = 0 \quad 2.14$$

Mais, selon la résolution verticale, ce point d'inflexion "n'existe pas" toujours (c.-à-d. que la dérivée seconde n'est pas forcément égale à 0). Le point d'inflexion a donc été identifié en utilisant le changement de signe de la dérivée seconde.

Des exemples des points d'inflexions retrouvés sont donnés dans la Figure 2.7b. En utilisant ces couples de points d'inflexions d'altitude haute (l_{2i-1}) et basse (l_{2i}), la position m_i et la demi-largeur σ_i de l'onde i sont trouvées comme :

$$\begin{cases} m_i = \frac{l_{2i-1} + l_{2i}}{2} \\ \sigma_i = \frac{|l_{2i-1} - l_{2i}|}{2} \end{cases} \quad 2.15$$

SIMULATION D'ONDE GAUSSIENNE

Avec ces positions et demi-largeurs, le signal lidar est reproduit à partir des ondes gaussiennes i selon l'équation 2.12 en supposant une amplitude a_i . Des exemples d'ondes gaussiennes sont donnés dans la Figure 2.7c, leur amplitudes ont été choisies égale à 0.05 pour une bonne visualisation.

Pour finaliser la reconstruction du signal lidar, les amplitudes sont estimées en utilisant une méthode des moindres carrés (« Least-squares method » en anglais) non négatif (Lawson and Hanson, 1974; Marquardt, 1963). En fait, une fonction du MATLAB (« lsqnonneg ») donne directement les valeurs des a_i . Ces valeurs sont ensuite utilisées toujours par l'équation 2.12 pour simuler le profil lidar dans la structure forestière (comme dans la Figure 2.7d).

OPTIMISATION

Dans le profil simulé, la majorité des ondes sont associées à des bruits. Nous réduisons donc le nombre de gaussiennes utilisées pour la décomposition du profil lidar par une procédure d'optimisation. Nous ne gardons que les ondes gaussiennes avec une demi-largeur plus grande ou égale à celle de la réponse impulsionnelle initiale. En même temps, leur amplitude estimée doit être plus grande que 3 fois d'écart-type du bruit. Avec ces nouvelles contraintes, le profil simulé est optimisé en ne gardant que les ondes gaussiennes "utiles", comme illustré sur Figure 2.7e.

RESULTAT FINAL

Le résultat final est présenté sur la Figure 2.7f où le signal lidar d'origine est parfaitement reconstruit. Cette approche permet de visualiser plus clairement les différentes contributions au signal lidar dans la structure interne de la canopée forestière. Nous allons voir maintenant comment cette approche par ajustement d'une famille d'ondes gaussiennes se compare à la méthode à seuil.

2.3.2.3. Comparaison entre les 2 algorithmes

A partir des deux algorithmes précédents, on peut extraire, des profils lidar, des informations structurales sur la canopée forestière. La Figure 2.8 donne un exemple du profil lidar traité par les 2 méthodes. Les détections du sommet de la canopée et du sol sont bien mises en évidence. Les deux approches conduisent à des résultats similaires pour la restitution de la hauteur d'arbre pour les forêt peu dense (e.g. données d'hiver), comme montré sur la Figure 2.9. Néanmoins, avec la méthode de seuillage, le traitement du signal est beaucoup plus rapide. C'est un avantage pour traiter les gigas de données disponibles lors de campagnes aéroportées au-dessus de la forêt. En plus, la méthode du seuillage est moins biaisé sur les profils des forêts dense. Nous avons donc utilisé cette méthode pour la plupart de nos traitements. Mais, avec la méthode gaussienne, on aura plus de détails sur la structure interne de la forêt. Par exemple, nous avons effectué une étude de classification sur la forêt de Barbeau en considérant le nombre d'ondes gaussiennes qui représente le nombre de couches verticales, le résultat sera présenté dans la section 3.2.3.1 du chapitre 3.

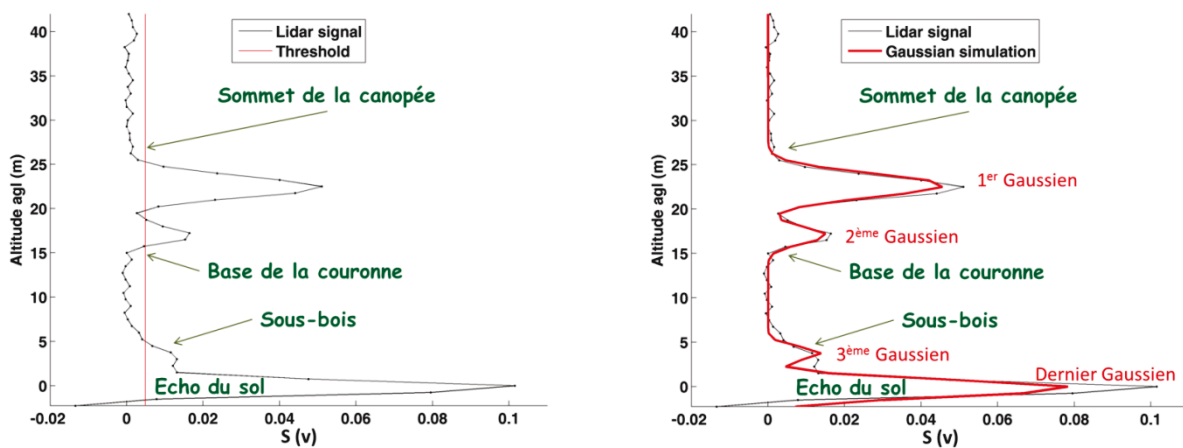


Figure 2.8. Exemple de profil lidar sur la forêt de Barbeau avec deux méthodes pour le traitement du signal. Gauche : Méthode du seuillage. Droite : Méthode gaussienne.

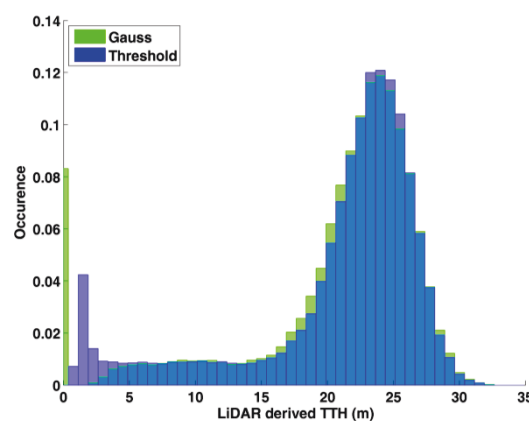


Figure 2.9. Histogrammes des hauteurs d'arbres (TTH) retrouvées par les 2 algorithmes (méthode gaussienne en vert, méthode du seuillage en bleu superposé au-dessus) à partir des même profils lidar mesurés sur la forêt de Barbeau dans l'hiver.

2.3.2.4. Paramètres forestiers déduit par lidar

Pour caractériser un site forestier, des paramètres clés peuvent être déduits à partir des mesures lidar. Quatre paramètres représentatifs du couvert forestier peuvent être estimés : la hauteur d'arbre (tree top height – TTH) comme vu précédemment, la hauteur quadratique moyenne (quadratic mean canopy height – QMCH), l'épaisseur optique de la forêt (Forest optical thickness – FOT) et le profil vertical d'extinction ($\alpha_{forêt}$). Les applications et les intérêts de tous ces paramètres seront donnés au chapitre 3.

Avec les 2 algorithmes décrits ci-dessus, la hauteur d'arbre est calculée directement par la distance entre le premier écho (le sommet du canopée) et le dernier écho (l'écho du sol) en supposant que l'écho du sol est disponible (Cuesta et al., 2010; Shang and Chazette, 2014).

La hauteur quadratique moyenne et l'épaisseur optique de la forêt, prenant en compte l'ensemble du profil lidar dans le couvert forestier, incluent toutes les informations verticales dans un profil lidar. Leurs calculs sont présentés dans cette section, ainsi que le profil d'extinction nécessaire pour déterminer la FOT. Des paramètres intermédiaires sont également calculés sous forme de profils verticaux, un exemple sur lequel nous reviendrons est donné dans la Figure 2.10.

LE THP, « transmittance height profile » en anglais (Ahmed et al., 2013; Shang and Chazette, 2014), est la fraction du ciel couvert par de la végétation. $THP(h)$ représente la probabilité d'avoir des feuilles au-dessus de la hauteur h , qui est aussi une densité de probabilité cumulée qu'un photon n'atteigne pas le niveau h après avoir traversé la canopée entre le sommet TTH et h . Il peut être calculé par le rapport entre la somme des signaux rétrodiffusés au-dessus de la hauteur h et le signal rétrodiffusé total :

$$THP(h) = \frac{IS(h)}{IS(0)} = \frac{\int_h^{TTH} (Z_p - z)^2 \cdot S(z) \cdot dz}{\int_0^{TTH} (Z_p - z)^2 \cdot S(z) \cdot dz} \quad 2.16$$

où $IS(h)$ est le signal intégré (« Integrated Signal » en anglais) du sommet d'arbre TTH à la hauteur h . Le signal lidar S utilisé est corrigé de la distance au carré (correction de l'angle solide).

Dans la canopée, on suppose que la partie rétrodiffusée d'atmosphérique dans le signal lidar est négligeable par rapport à celle de la canopée ($\Gamma_{atmosphere}(h) \ll \Gamma_{foret}(h)$ pour $h \leq TTH$). En réalité, l'épaisseur optique de la forêt FOT est 2 fois de l'épaisseur optique apparente de la forêt Γ_{foret} . On suppose que le BER est constant pour tous les niveaux dans la canopée, et le coefficient de la diffusion multiple η est 1 dans UV, ce signal intégré $IS(h)$ peut donc être simplifié en prenant compte de les équations lidar 2.1 et du BER 2.7:

$$\begin{aligned} IS(h) &= \int_h^{TTH} K \cdot \beta(z) \cdot \exp[-2\Gamma_{foret}(z)] \cdot dz \\ &= K \cdot BER \cdot \int_h^{TTH} \alpha(z) \cdot \exp[-FOT(z)] \cdot dz \\ &= K \cdot BER \cdot \int_{\Gamma(h)}^{\Gamma(TTH)} -\exp[-FOT(z)] \cdot dFOT(z) \\ &= K \cdot BER \cdot [\exp(-FOT(z))]_{FOT(h)}^{FOT(TTH)} \\ &= K \cdot BER \cdot [\exp(-FOT(TTH)) - \exp(-FOT(h))] \\ &= K \cdot BER \cdot [1 - \exp(-FOT(h))] \end{aligned} \quad 2.17$$

On peut donc écrire THP en fonction de $\Gamma_{foret}(h)$ (épaisseur optique apparente de la forêt entre h et TTH) comme :

$$THP(h) = \frac{1 - \exp(-2\Gamma_{foret}(h))}{1 - \exp(-2\Gamma_{foret}(0))} \quad 2.18$$

On a supposé ici que l'épaisseur optique atmosphérique dans la canopée était bien inférieure à celle de la forêt. Un exemple de profil THP est donné sur la Figure 2.10.

LE CHP, « canopy height profile » en anglais (Lefsky et al., 1999b; Shang and Chazette, 2014), est une densité de probabilité qu'un photon provenant du niveau h n'atteigne pas le niveau $h-dh$. $CHP(h)$ représente aussi la probabilité d'avoir des feuilles entre la hauteur h et $h-dh$.

On a donc comme relation de probabilité :

$$\underbrace{1 - THP(h - dh)}_{\text{Probabilité pour qu'au moins un photon atteigne le niveau } h-dh} = \underbrace{(1 - THP(h))}_{\text{Probabilité pour qu'au moins un photon atteigne le niveau } h} \cdot \underbrace{(1 - CHP(h)dh)}_{\text{Probabilité pour qu'au moins un photon passe du niveau } h \text{ au niveau } h-dh} \quad 2.19$$

Ce qui peut également s'écrire sous la forme :

$$CHP(h) = \frac{d \ln(1 - THP(h))}{dh} \quad 2.20$$

L'allure du profil de CHP est donnée sur la Figure 2.10.

LE QMCH, « quadratic mean canopy height » en Anglais (Lefsky et al., 1999b), s'exprime à partir de la densité de probabilité CHP par :

$$QMCH = \sqrt{\int_{TTH}^0 h^2 \cdot CHP(h) \cdot dh} \quad 2.21$$

LE CCHP, « cumulative canopy height profile » en Anglais, est déduit lors de l'intégration de CHP et donc de l'équation 2.20 (Figure 2.10) :

$$CCHP(h) = -\ln(1 - THP(h)) \quad 2.22$$

LA FOT, « forest optical thickness » en Anglais, s'exprime de manière similaire à $CCHP$. Si $FOT(0) \gg 1$, ce qui est souvent le cas pour les forêts denses, l'équation 2.18 donne la FOT, qui est aussi liée au CCHP :

$$FOT(h) = 2\Gamma_{foret}(h) = -\ln(1 - THP(h)) = CCHP \quad 2.23$$

LE COEFFICIENT D'EXTINCTION DE LA FORET est directement déduit à partir de l'épaisseur optique (équation 2.3), est donc peut s'exprimer par le THP (équation 2.18), et il est aussi lié au CHP :

$$\alpha_{forêt}(h) = \frac{\partial \ln(1 - THP(h))}{\partial h} = CHP \quad 2.24$$

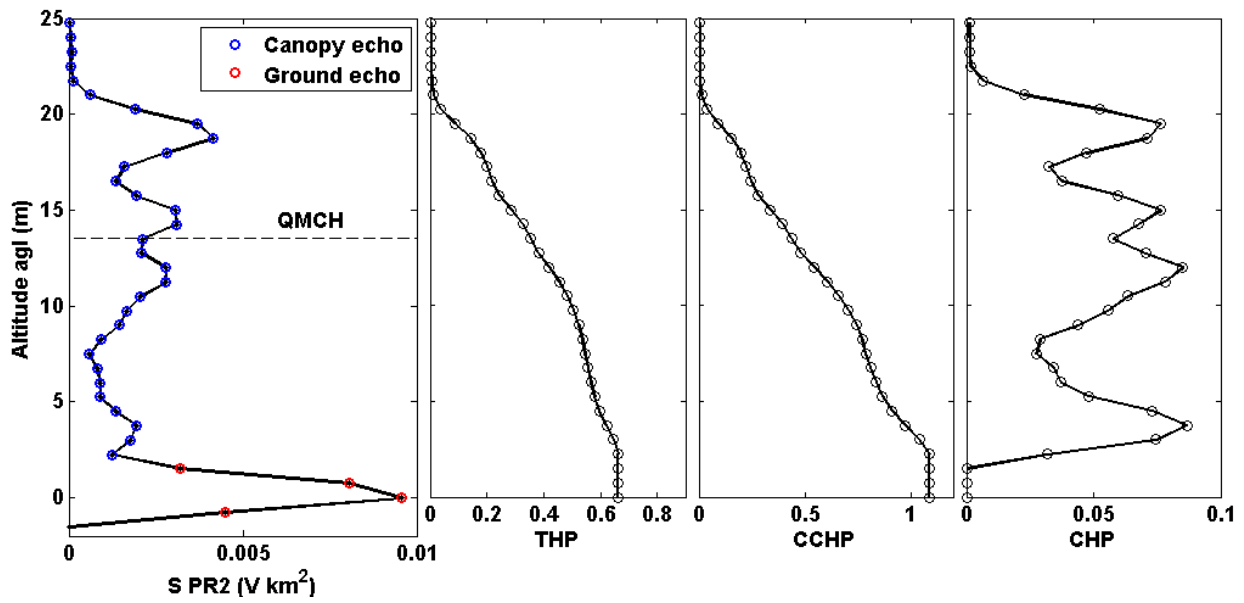


Figure 2.10. Exemples de profils. De gauche à droite : S PR2-profil lidar corrigé de la distance, THP-transmittance height profile, CCHP-cumulative canopy height profile, CHP-canopy height profile.

2.4. Approche: un couplage entre les mesures et une modélisation « end-to-end »

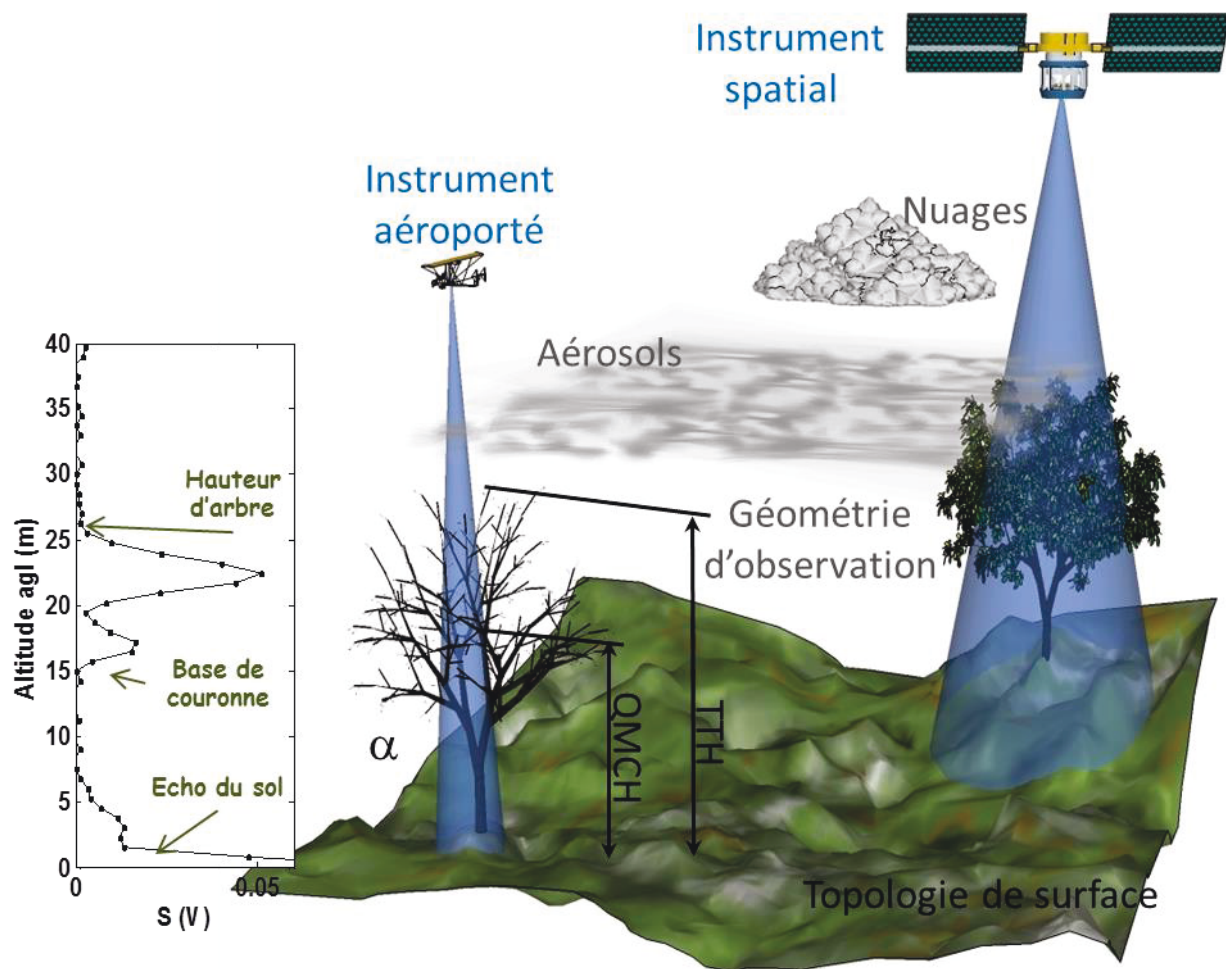


Figure 2.11. Illustration des mesures lidar aéroportées et spatiales. Dans le bloque noire à gauche : un exemple du profil lidar aéroporté est donné.

Afin de disposer d'un outil efficace pour évaluer l'impact des différentes sources d'incertitude sur les paramètres forestiers restitués à partir de la mesure lidar, une approche semi-empirique a été conduite. Elle utilise un couplage entre les mesures aéroportées conduites durant ma thèse et la modélisation numérique. En effet, les campagnes de mesures aéroportées ont permis de constituer une base de données lidar de référence sans précédent en France pour différents biomes forestiers. A partir de cette base, les paramètres structuraux de hauteur d'arbre et de hauteur pondérée ont été évalués. Ces paramètres permettent de contraindre l'évaluation des stocks de carbone dans le système forestier (plus de détail dans Chapitre 3). Les différents échantillons ainsi obtenus sont utilisés par la suite afin de simuler la mesure lidar à partir d'un satellite. Une illustration des mesures lidar aéroportées et spatiales est donnée dans la Figure 2.11.

Dans cette partie, je vais tout d'abord présenter le principe du simulateur, puis les sites forestiers de référence. L'approche expérimentale sera présentée pour finaliser.

2.4.1. Simulateur « end-to-end »

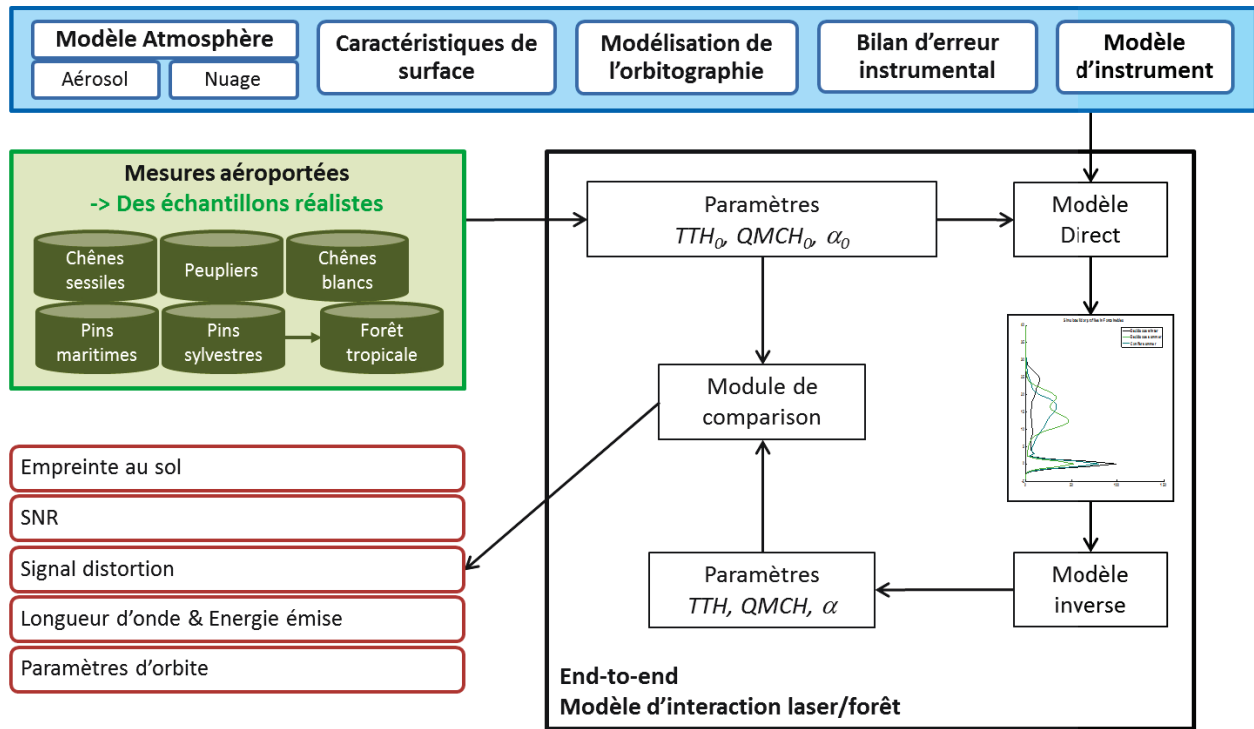


Figure 2.12. Bloc diagramme du end-to-end simulateur

Un simulateur numérique dit « end-to-end » a été développé, dont le principe est présenté dans la Figure 2.12. Il y a 4 blocs :

- Le module d'interaction laser/forêt (end-to-end canopée) en noir. Il intègre les modèles direct et inverse présentés précédemment.
- Les échantillons de mesures lidar obtenus sur divers sites forestiers durant ma thèse, en vert.
- Des données exogènes et d'initialisation en bleu.
- Les paramètres critiques retrouvés de l'instrument et d'orbite en rouge.

La procédure de simulation est la suivante. Premièrement, des échantillons représentatifs sont choisis à partir des mesures lidar aéroportées sur les différents types de couverts forestiers. Après le traitement du signal grâce aux algorithmes décrits dans la partie « 2.3.2. Modélisation inverse », les paramètres structuraux et optiques (i.e. tree top height (TTH), quadratic mean canopy height (QMCH) et coefficient d'extinction ($\alpha_{forêt}$); (Shang and Chazette, 2014)) ont été déduits afin d'initialiser le modèle direct.

La modélisation directe permet en effet d'obtenir des profils lidar synthétiques bien connus en utilisant l'équation 2.1. Pour cette simulation, 5 types de données exogènes ont été utilisées. Elles sont présentées sur la partie supérieure de la Figure 2.12. Elles permettent d'apporter les contraintes complémentaires nécessaires à la modélisation directe. Trois paramètres importants sont évalués : la constante instrumentale (K), le rapport des coefficients de rétrodiffusion et d'extinction (BER) dans la canopée, et l'écho du sol relié à la réflectance de la surface. Une description plus détaillée de cette reconstruction du signal lidar sera donnée dans le chapitre 5.

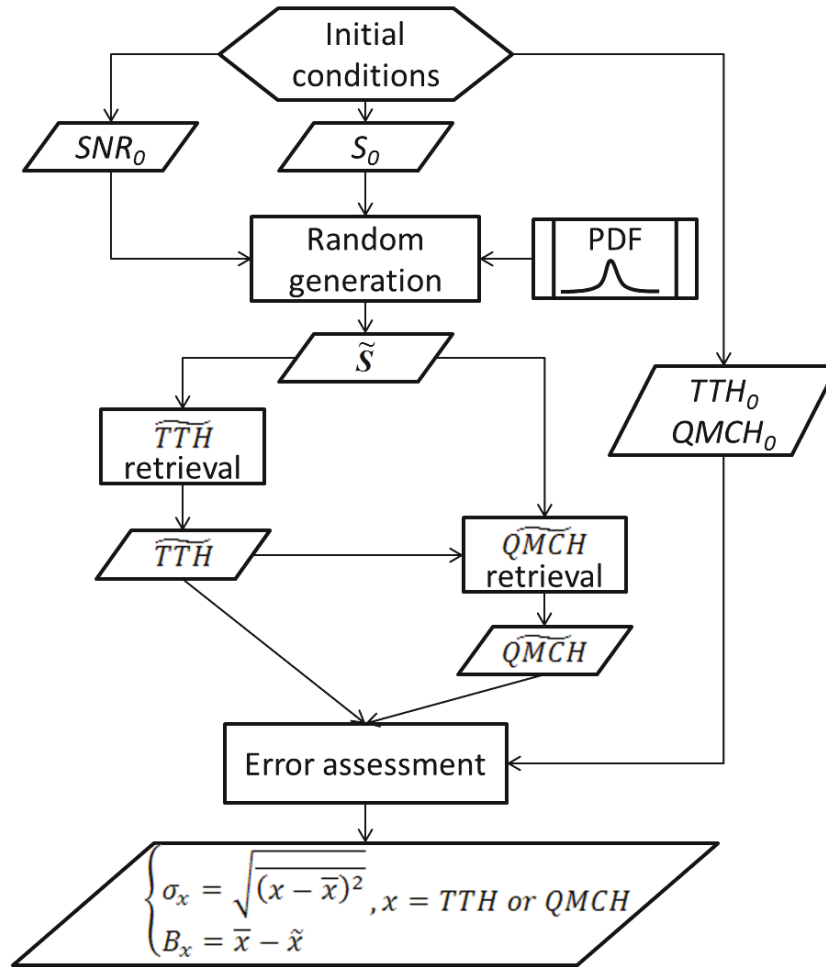


Figure 2.13. Organigramme de l'analyse statistique de Monte Carlo utilisée pour évaluer les biais et les incertitudes sur les paramètres forestiers.

Afin d'évaluer l'impact des sources d'incertitude sur les différents paramètres clés restitués à partir de la mesure lidar, une analyse statistique a été effectuée via une méthode de Monte Carlo. Celle-ci se justifie car les erreurs relatives peuvent être importantes et une approche au premier, même au second ordre, pour l'évaluation des erreurs statistiques ne sera pas adaptée. L'organigramme de la procédure de Monte Carlo utilisée est donné sur la Figure 2.13. Les sources de bruit ont été considérées comme suivant des distributions normales. Pour chaque profil, 200 réalisations aléatoires assurant une distribution normale autour de la valeur moyenne sont pris en compte. Un exemple pour une réalisation aléatoire est donné à la Figure 2.14. Les niveaux des bruits sont directement dépendants du SNR qui peut être pris comme une variable d'entrée du simulateur lors d'études de sensibilité.

Un ensemble de réalisations aléatoires de profils lidar a donc été calculé pour chaque profil échantillon de référence. Cet ensemble est ensuite utilisé comme entrée du modèle inverse pour restituer les estimateurs des paramètres structuraux et optiques de la forêt. Ces estimateurs sont par la suite comparés aux données d'entrées afin d'évaluer les biais et les écarts types sur les paramètres forestiers étudiés, et pour définir les paramètres critiques du système lidar et de l'orbite de la plateforme spatiale (ou l'altitude de vol de l'aéronef).

Nous allons voir maintenant quelle a été l'approche expérimentale qui a permis la constitution de la base de profils lidar de références pour différents types de forêts. C'est un point très important car toutes les études d'incertitude conduites dépendent de la qualité de cette base de données.

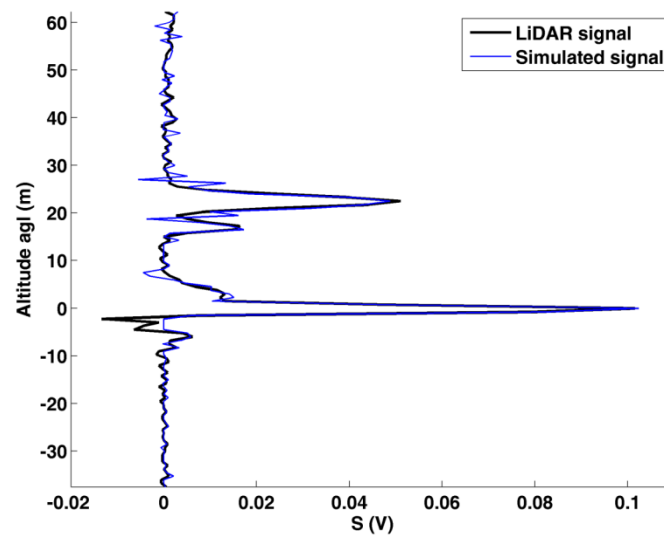


Figure 2.14. Exemple d'une réalisation aléatoire (bleu) superposée sur le signal moyen initial (noir)

2.4.2. L'approche expérimentale

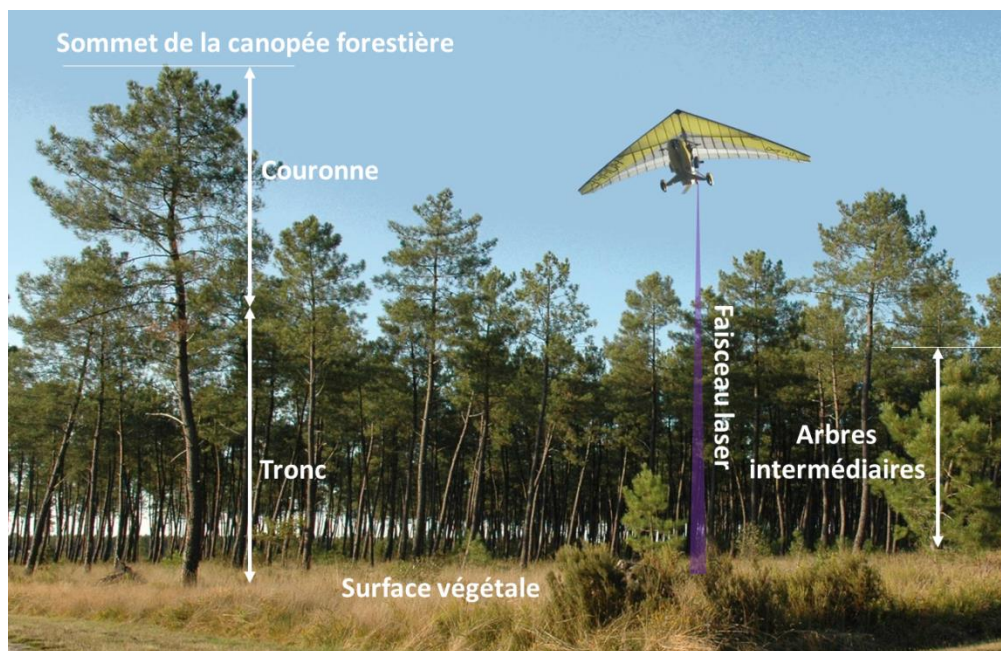


Figure 2.15. Principe de la mesure lidar aéroportée. (Prise de vue : P. Chazette, sur la forêt de Landes)

La Figure 2.15 illustre le principe de la mesure lidar aéroportée sur un site de la forêt des Landes. L'ULM, « ultra-light aircraft » en Anglais, de la société AircréationTM (<http://aircreation.fr/>), a embarqué le lidar canopée pour toutes les expériences qui ont été conduites. Il a volé principalement à des altitudes par rapport au sol comprises entre 300 et 500 m. Le choix de ces altitudes a été dicté par la nécessité que le pilote puisse facilement localiser les parcelles forestières au cours du vol. Le rayon laser est émis vers le bas, vers la forêt, avec un angle de pointage près du nadir. Les empreintes laser au niveau du sol peuvent être ajustées par la divergence de ce dernier et l'altitude de l'ULM. De cette manière, nous avons pu explorer des empreintes au sol de diamètre compris entre 1 et 20 m. Les données ainsi acquises, sont ensuite traitées via les algorithmes présentés précédemment pour

permettre l'extraction des hauteurs caractéristiques du couvert forestier. Les profils lidar rétrodiffusés montrent les échos des différentes structures de la forêt : le sommet des arbres, l'épaisseur de la couronne et le sous-bois. Les caractéristiques de l'ULM et des instruments exogènes embarqués seront présenté dans les chapitres 3 et 4 (Shang and Chazette, 2014, 2015).

2.4.2.1. Méthode d'échantillonnage spatial

ECHANTILLONNAGE HORIZONTAL

Le lidar (ULICE) ne balaye pas, c'est donc le déplacement de l'ULM qui détermine l'échantillonnage horizontal. En fait, l'échantillonnage horizontal est défini par la taille de l'empreinte du laser au sol, la fréquence de répétition du laser, et la vitesse et la densité des vols de l'ULM. Ces caractéristiques jouent sur les 3 coefficients qui définissent un échantillonnage horizontal, comme illustré dans la Figure 2.16 : le rayon de l'empreinte au sol (R), la distance entre deux empreintes laser (tirs lidar) consécutifs (D), et la distance entre 2 traces au sol du lidar (L).

Pour augmenter l'échantillonnage horizontal, nous avons donc effectué des vols croisés sur les sites étudiés. La Figure 2.17 donne l'exemple de l'échantillonnage intense utilisé sur la forêt de Barbeau. Quatre vols croisés ont été effectués afin de construire l'échantillonnage. Chaque vol avait une durée approximative de 2 heures (Figure 2.17a). Ces vols ont ensuite été regroupés pour densifier l'échantillonnage (Figure 2.17b). La zone effectivement étudiée était comprise dans l'intersection de l'ensemble de 4 vols (carré en trait noir sur la Figure 2.17b).

Afin d'étudier la représentativité des mesures lidar avec différents étalonnages horizontaux, nous avons comparé les résultats grâce à des histogrammes de hauteurs d'arbres normalisées pour différentes distances entre les spots lidar au sol. Comme le montre la Figure 2.18, pour le cas de la forêt de Barbeau, les histogrammes sont presque identiques et laissent apparaître la possibilité de relâcher la contrainte sur l'échantillonnage horizontal pour de grandes surfaces forestières. Cet impact sera aussi discuté dans le chapitre 4 pour l'étude de la forêt tropicale.

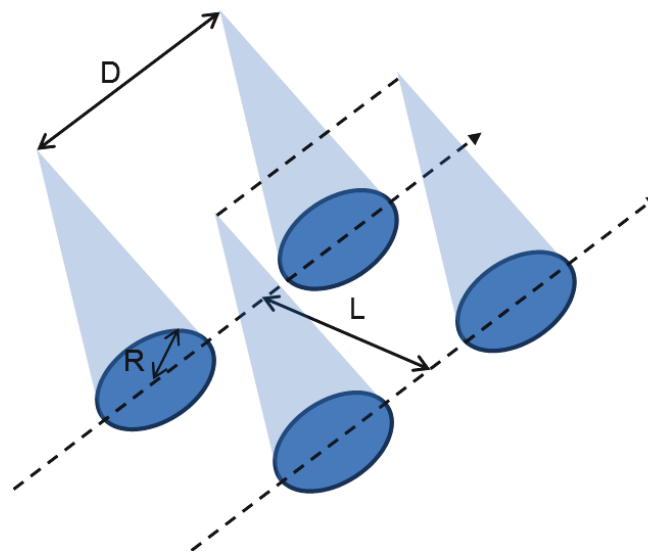


Figure 2.16. Représentation schématique de l'échantillonnage horizontal pour le lidar aéroporté.

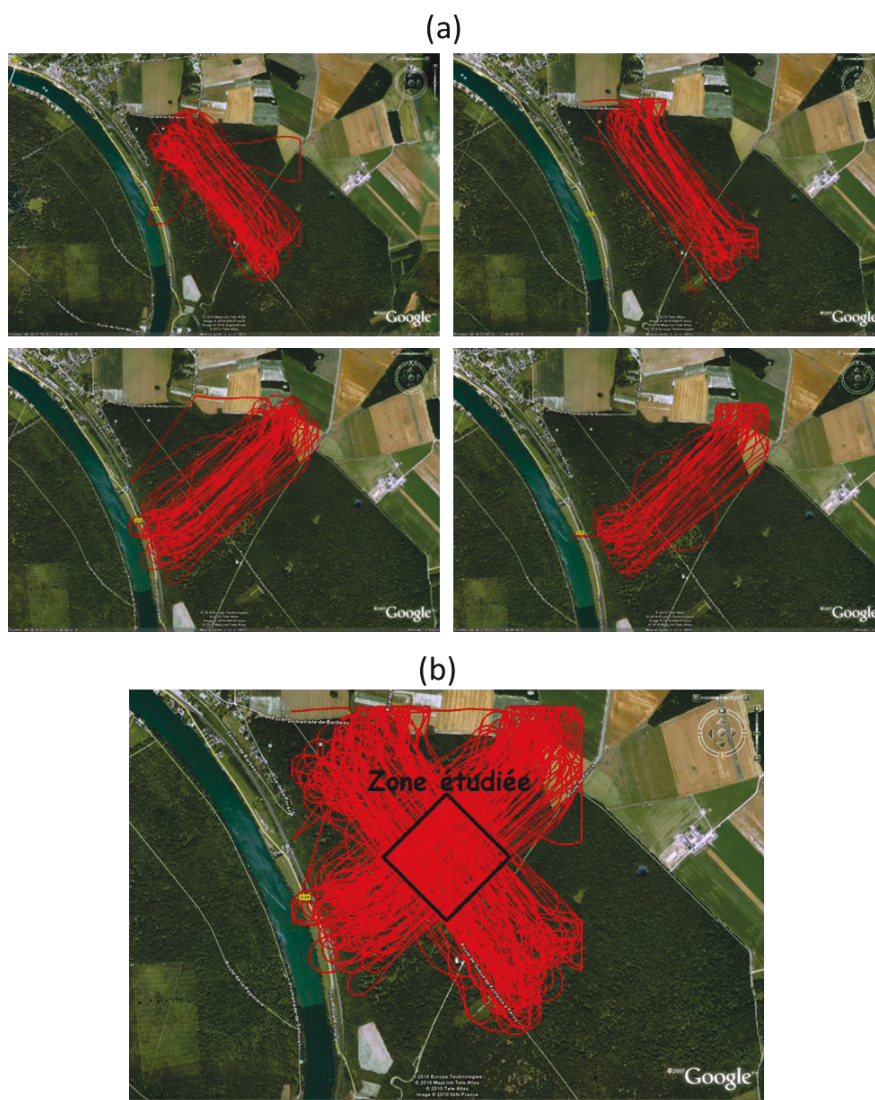


Figure 2.17. (a) Traces au sol du lidar canopée (ULICE) pendant 4 vols. (b) Synthèse des traces au sol du lidar canopée. (Forêt de Barbeau, c.f. section 3.3.1)

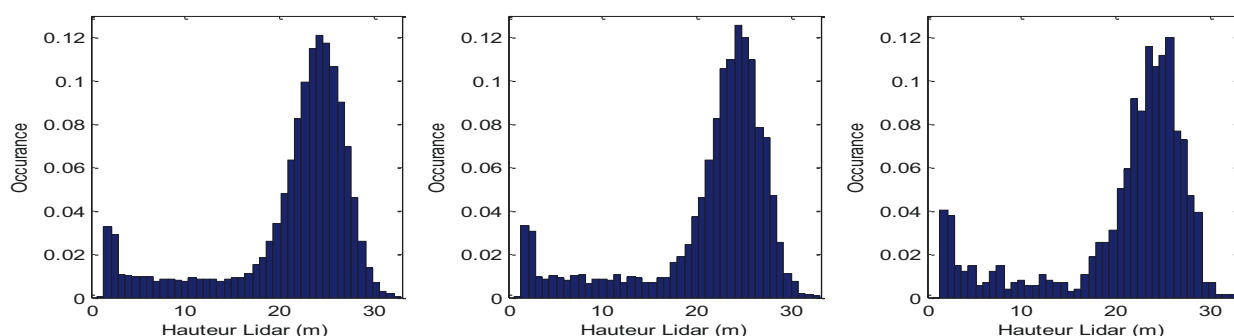


Figure 2.18. Répartition statistique normalisée de la hauteur des arbres pour un échantillonnage tous les ~1.5, 5 et 10 m (de gauche à droite) en Forêt de Barbeau.

ECHANTILLONNAGE VERTICAL

Dans nos expériences aéroportées, nous avons choisi une fréquence d'échantillonnage conduisant à une résolution verticale du lidar de 0.3 m à 1.5 m. En fait, il n'y a pas grande différence entre les résolutions verticales de 0.3 m à 3 m sur la contribution à l'incertitude pour l'estimation de la hauteur d'arbre. Ceci est montré sur la Figure 2.19 à partir de simulations utilisant le modèle « end-to-end ».

Ceci justifie notre choix de la fréquence d'échantillonnage, souvent prise à 200 MHz (0.75 m de résolution verticale). Il est clair que l'effet sera plus important pour les petits arbres, inférieurs à 10 m.

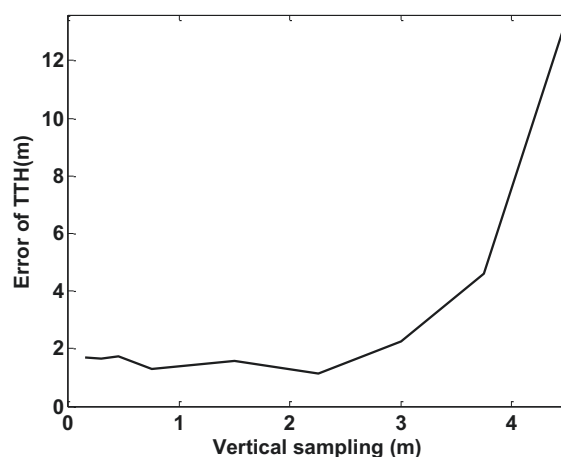


Figure 2.19. Incertitude sur l'estimation de la hauteur d'arbre (TTH) en fonction de la résolution verticale du système lidar.

2.4.2.2. Sites forestiers étudiés



Figure 2.20. Locations des sites forestiers étudiés pendant ma thèse.

Forêt	Type d'arbre principal	Période	Durée de campagne	Surface échantillonnée
Landes Région de l'OHP ¹	Résineux	Sep. 2008	2 semaines	170 ha
	Feuillus	Mai. 2012	2 semaines	30 ha
		Nov. 2010	2 semaines	25 ha
Fontainebleau	Feuillus	Jun. 2012	2.5 semaines	4000 ha
		Mar. 2013	1 semaine	5 ha
Ile de la Réunion	Tropicaux	Mai 2014	2 semaines	450 ha

Tableau 2.2. Informations sur les sites forestiers échantillonnés par le lidar aéroporté. ¹Observatoire de Haute Provence

Les sites forestiers que j'ai étudiés pendant ma thèse sont montrés sur la Figure 2.20. Leur localisation et autres informations sont données dans le Tableau 2.2. Les premières études de la forêt par lidar aéroporté ont commencé en 2008 avec une expérience novatrice au-dessus de la forêt des Landes (Cuesta et al., 2010). C'est pour cette campagne que le système lidar (LAUVAC) dédié aux études d'aérosols a été adapté pour mesurer des pins maritimes, avec une résolution verticale de 1.5 m. La deuxième expérience était au-dessus de la forêt de Fontainebleau avec le lidar (ULICE) spécifiquement dédié à l'étude des forêts, avec une résolution verticale de 0.75 m (Shang and Chazette, 2014). La résolution verticale a été diminuée à 0.3 m pour mesurer les petits arbres (chênes blancs) sur le site l'Observatoire de Haute Provence (OHP). D'autres sites forestiers autour de l'OHP ont également été échantillonnés. Tous ces sites font partie de forêts de moyenne latitude. Pour avoir une vision plus globale des capacités d'un système lidar dédié à l'étude des forêts, des forêts tropicales sur l'Ile de la Réunion ont été récemment échantillonnées par le système ULICE. Les études sur tous ces sites seront présentées dans les prochains chapitres.

2.5. Conclusion

Nous avons défini ce qu'est un système lidar et à quoi il pouvait donner accès en termes de paramètres forestiers, que ce soit sur la structure du couvert, comme sur les propriétés optiques de la forêt. Le modèle numérique « end-to-end » que j'ai développé a été utilisé afin d'obtenir plusieurs résultats au cours de cette thèse. C'est un outil, couplé aux observations lidar effectuées lors de campagnes aéroportées, qui permet une évaluation précise des incertitudes sur la mesure, mais également sur les paramètres restitués.

Maintenant que les bases de la mesure lidar aéroportée sur les couverts forestiers sont posées, les chapitres suivants vont plus spécifiquement traiter des applications pour répondre à différents questionnements scientifiques :

- Quel est le lien entre la hauteur des arbres et les quantités de biomasse, et comment l'obtenir ?
- Avec quelles précisions peut-on remonter aux paramètres forestiers structuraux et optiques, puis également à la quantité de biomasse aérienne ?
- Quelles sont les capacités d'un système lidar embarqué pour l'étude de différents environnements forestiers, allant de la forêt de moyenne latitude à la forêt tropicale ?
- Quelles sont les caractéristiques optimales nécessaires pour une mesure lidar à partir de l'espace et quelles en sont les limitations ?

Bien évidemment, ces questions amènent d'autres questions qui apparaîtront au cours de ce document.

Nous allons progressivement nous diriger vers le bilan de liaison instrumental d'un système lidar embarqué sur plateforme spatiale. Avant cela, nous allons montrer des applications concrètes allant de l'estimation des hauteurs d'arbre à l'évaluation de la quantité de biomasse aérienne. Ces résultats utilisent l'ensemble des notions présentées dans ce chapitre.

3 Paramètres forestiers

3.1. Introduction

La caractérisation de la forêt et l'évaluation de ses impacts sur le climat et la physico-chimie de l'atmosphère passe par une évaluation précise de ses propriétés structurales et optiques. Ce chapitre est principalement dédié aux résultats obtenus durant cette thèse sur la restitution des précédentes propriétés pour différents types de couverts forestiers. Ce travail a nécessité la constitution d'une base de données lidar aéroportées acquises sur des sites représentatifs du couvert forestier français, et même européen.

Nous ne reviendrons pas sur les principales équations qui font le lien entre les paramètres de structure et d'optiques car elles ont été présentées dans le précédent chapitre. Nous allons surtout insister sur les principaux résultats déduits des mesures lidar aéroportées principalement acquises pour ce travail de thèse. Ce chapitre est construit autour d'une publication à comité de lecture qui a été publiée dans la revue internationale « Forests » (Shang and Chazette, 2014). Les travaux de recherche présentés dans cette publication sont complétés par des résultats obtenus à partir d'observations lidar complémentaires.

Toutes les campagnes de mesures conduites pour fabriquer la base de données de profils lidar utilisées pour ce travail de recherche avaient comme objectif initial de tester les performances d'un système lidar canopée ultraviolet (UV) à moyenne empreinte développé initialement au LSCE. L'utilisation de l'UV est récente en foresterie pour ce type de mesure. Elle n'a jusqu'ici qu'été testée en France (Cuesta et al., 2010), mais le bilan d'erreur se devait d'être sérieusement complété.

Dans une première partie, nous allons montrer les résultats obtenus sur la restitution de la hauteur des arbres. Ces hauteurs seront comparées aux mesures *in situ* existantes afin de valider l'approche utilisée. Sur un site particulier, mieux documenté et proche de la forêt de Fontainebleau, nous présenterons une première étude de classification se reposant sur la détection de hauteur des arbres utilisant l'approche

gaussienne précédemment présentée. L'étude de la structure interne des forêts sera présentée dans une seconde partie. On insistera surtout sur la hauteur quadratique moyenne des arbres qui a été démontrée comme étroitement liée à la quantité de biomasse aérienne (Lefsky et al., 1999b). On montrera en quoi l'utilisation de ce paramètre est préférable à l'utilisation de la simple hauteur de la canopée forestière. C'est dans la troisième partie que nous verrons dans quelle mesure il est possible de faire une estimation du LAI (Leaf Area Index). Bien que les données disponibles pour avaliser cette approche sont peu nombreuses, nous la discuterons au regard de l'expérience aéroportée conduite sur la forêt des Landes en utilisant la synergie de mesure avec le capteur spatial MODIS.

3.2. Hauteur d'arbre (TTH)

Dans cette section nous présentons les résultats sur la restitution des hauteurs des arbres, « tree top height (TTH) » en anglais, en France. On s'est intéressé à étudier différents canopées représentative de différentes espèces et locales.

3.2.1. Forêt des Landes : une première vision des zones forestières en croissance

La première expérimentation lidar conduite par le LSCE pour des applications forestières s'est déroulée sur la forêt des Landes (44°30' N, 0°40' W ; Figure 3.1) en septembre 2008. Le système lidar utilisé était d'origine pour l'étude de l'atmosphère, plus de détails sont décrits dans Cuesta *et al.* (2010). Cette expérience a donc eu lieu avant le commencement de ma thèse, mais j'ai pu récupérer le jeu de données afin de compléter mes travaux de recherche. Trois parcelles ont été survolées par le lidar canopée embarqué sur un ULM : la parcelle de Bray (près d'Arcachon) et deux parcelles proches de Mimizan. La résolution verticale du système lidar était à l'époque de 1.5 m pour échantillonner des arbres de hauteur généralement comprise entre 10 et 30 m. La forêt des Landes est une grande zone de sylviculture et les sites que nous avons étudiés ont tous été plantés et entretenus par l'homme. Il s'agit d'une forêt gérée, ce qui a facilité les premiers tests du lidar canopée. L'effet de la pente sur ces sites forestiers n'est pas considéré car les empreintes laser au sol sont petites et la surface assez horizontale (terrains ~plats).



Figure 3.1. Gauche : lidar LAUVAC (Lidar Aéroporté UltraViolet pour l'Atmosphère et la Canopée forestière) embarqué sur ULM. Milieu : ULM survolant la forêt des Landes. Droite : Localisation de la forêt des Landes (carré rouge) en France. (Cuesta et al., 2010)

PARCELLE DE BRAY

La parcelle de Bray (44°43'N, 0°46'O) est gérée et étudiée par l'INRA. Elle est recouverte exclusivement de pins maritimes. L'INRA y a effectué des mesures dendrométriques (hauteurs des arbres, diamètre des troncs) qui nous permettent de bénéficier de données *in situ* régulièrement réactualisées. La futaie régulière et mono-spécifique est composée de pins maritimes adultes âgés de 28 ans.

Les hauteurs des arbres mesurées par lidar aéroporté sont données dans la Figure 3.2a1. Elles ont été retrouvées à partir de l'algorithme à seuil présenté précédemment et viennent confirmer les travaux antérieurs (Cuesta et al., 2010). On peut également comparer les résultats sur la restitution de la hauteur du sommet des arbres mesurés par lidar aux mesures *in situ*. Les hauteurs mesurées par lidar sont inférieures aux hauteurs mesurées à partir du sol avec un biais de l'ordre de 1.3 m (Cuesta et al., 2010). Dans cette parcelle, les arbres adultes mesurent majoritairement entre 20 et 25 m de haut.

PARCELLE DE MIMIZAN

Les deux autres parcelles Mimizan1 (44°10'N, 1°10'O) et Mimizan2 (44°8'N, 1°10'O), sont aussi organisée en futaies régulières, également recouverte de pins maritimes, mais de classes d'âges différentes qui devraient être facilement mises en évidence grâce à la mesure lidar aéroportée.

Le site du Mimizan1 est composé de zones définissant des types d'occupation du sol très contrastés. D'ouest en est, un quart du site est couverte d'arbres éparses et de sol nu, un quart avec des arbres semi-cultivés de 50 ans ayant les hauteurs de ~25 m, un quart avec des arbres jeunes planté de 35 ans (avec les hauteurs de ~23 m) et un quart avec des arbres de 19 ans ayant les hauteurs de 15-16 m. Les hauteurs des arbres mesurées par lidar de ce site sont données dans la Figure 3.2b1, ou les différents zones sont très bien mises en évidence.

Les hauteurs des arbres mesurées du site Mimizan2 sont données dans la Figure 3.2c1 et c2. Le site peut être découpé en trois parties distinctes. Une première partie au Nord-Ouest est composée d'arbres de 10 ans d'âge, une seconde partie à l'Est est recouverte de pins plus âgés, de 55 ans, et une zone au centre-sud d'environ 100 m × 100 m est recouverte de très peu de végétation. Le recouvrement et la densité des points de mesures sur cette parcelle étant assez dense et homogènes, on peut définir une sous-maille d'échantillonnage de 5 m × 5 m afin d'identifier les arbres individuels. En effet, les pins maritimes sont espacés en moyenne de 4 à 6 m selon le type et les objectifs de l'exploitation forestière (mesures effectuées sur le terrain). La densité d'arbre peut donc être évaluée comme de l'ordre de 250 arbres/ha.

Cette première étude, que j'ai reprise au regard des nouveaux développements algorithmique de ma thèse (c.f. section 2.3.2), utilise un paramètre simple qu'est la hauteur des arbres. Elle montre que l'on peut très facilement localiser les parcelles forestières en développement par rapport à celles qui sont arrivées à maturité. C'est un élément important pour l'évaluation de l'impact des forêts comme modérateur de la concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère. C'est également intéressant pour le suivi dans le temps des exploitations forestières.

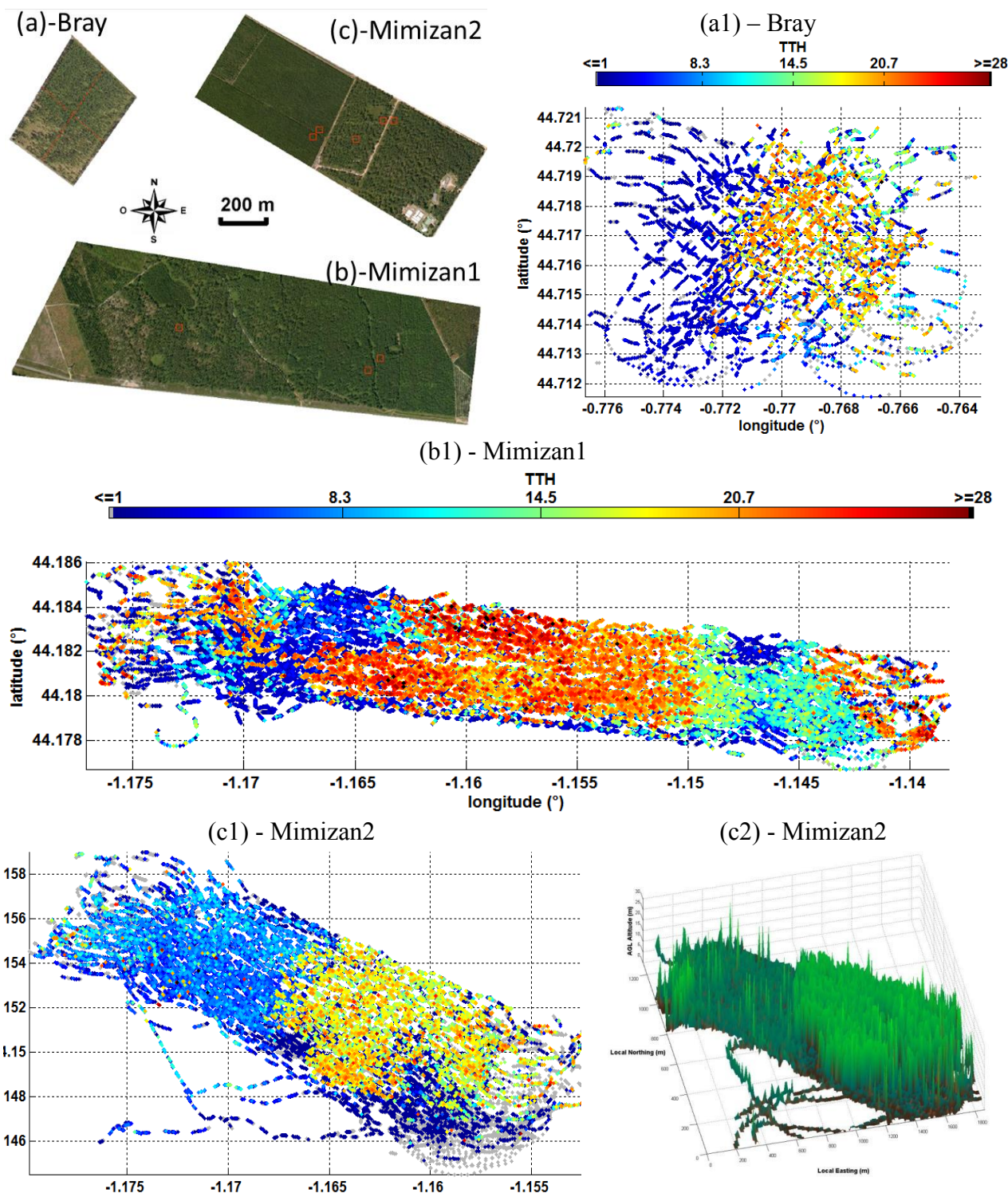


Figure 3.2. En haut à gauche : Vues de satellite (GoogleTM Earth) pour les 3 sites : (a) Bray, (b) Mimizan1 et (c) Mimizan2. (a1), (b1), (c1) : Hauteur d'arbre (TTH, en « mètre ») mesurée par lidar aéroporté correspondant aux parcelles étudiées. (c2) : Exemple de la restitution des arbres en 3D pour le site Mimizan2.

3.2.2. Région de l'Observatoire de Haute Provence (OHP) : Un échantillonnage verticale accru

Un pas d'échantillonnage vertical de l'ordre de 1.5 m était suffisant pour étudier le couvert forestier landais à condition que les arbres ne soient pas de trop petite taille. Nous avons vu au chapitre

précédent que le pas d'échantillonnage avait peu d'influence jusqu'à des valeurs de 3 m pour des arbres supérieurs à 20 m. En présence d'un couvert de taille inférieure, la question restait posée.

C'est en profitant de l'opportunité offerte par le programme ANR CANOPEE (Biosphere-atmosphere exchange or organic compounds: impact of intra-canopy processes) que nous avons été en mesure de tester une nouvelle carte d'acquisition à 1 GHz permettant un échantillonnage vertical accru (à partir de 15 cm au lieu de 1.5 m). Les expériences de terrain ont été conduites sur des sites forestiers sur et autour de l'Observatoire de Haute Provence (OHP), au sud de la France (44°N, 6°E ; Figure 3.3) en juin 2012. Nous avons utilisé un autre système lidar qui est normalement dédié à l'étude de l'atmosphère à partir du sol ou d'avions (Figure 3.3a,c).

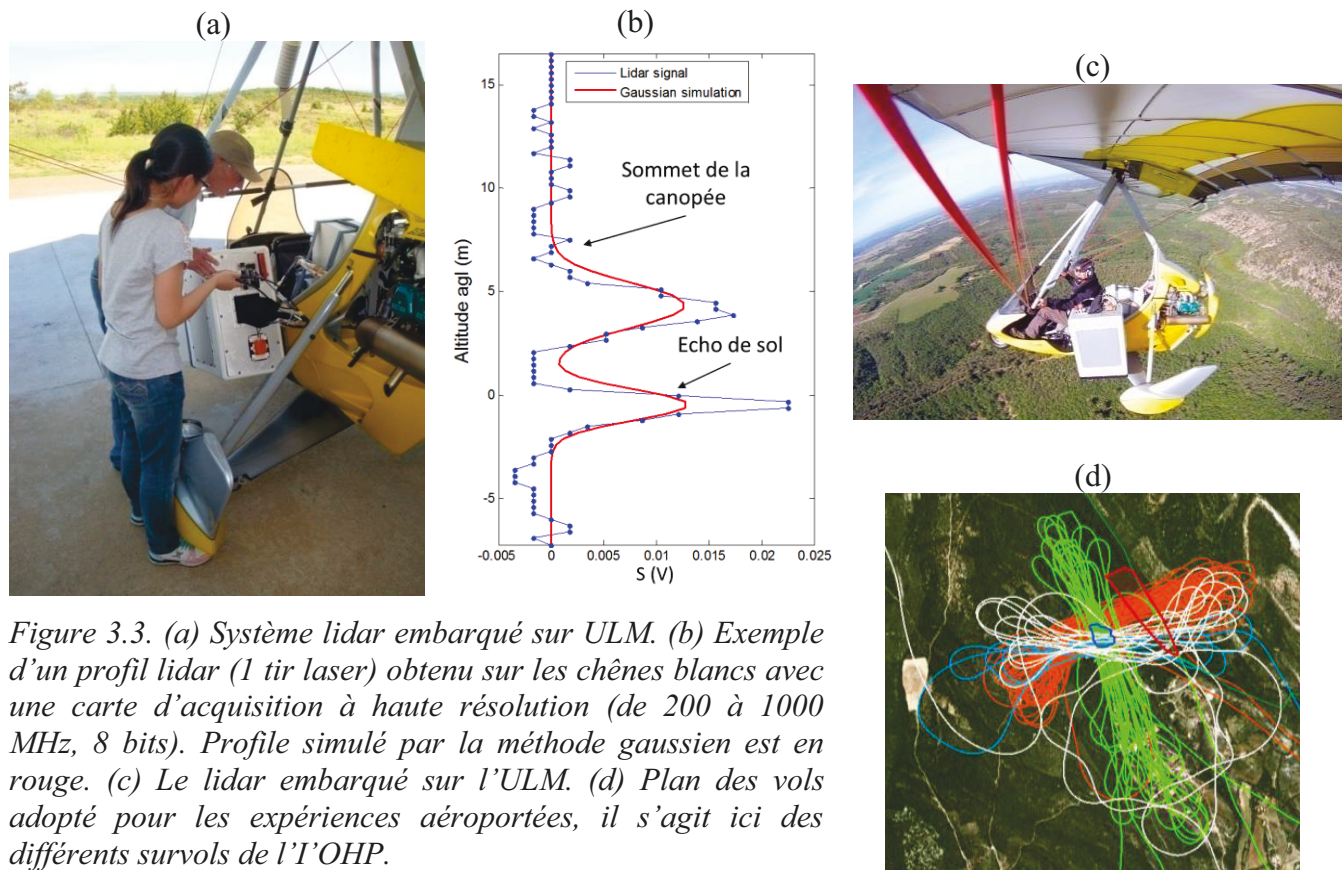


Figure 3.3. (a) Système lidar embarqué sur ULM. (b) Exemple d'un profil lidar (1 tir laser) obtenu sur les chênes blancs avec une carte d'acquisition à haute résolution (de 200 à 1000 MHz, 8 bits). Profil simulé par la méthode gaussien est en rouge. (c) Le lidar embarqué sur l'ULM. (d) Plan des vols adopté pour les expériences aéroportées, il s'agit ici des différents survols de l'OHP.

Le principal objectif scientifique du programme CANOPEE était d'évaluer les sources et puits de composés biogéniques que représentent les chênes blanc qui poussent sur le site de l'OHP. La mesure lidar, par l'évaluation de la hauteur de la canopée était un élément important afin de déterminer le volume d'émission et donc d'aider à l'estimation des facteurs d'émission des composés organiques volatiles biogéniques (BVOC).

En termes de résultats, notre retour sur la carte d'acquisition est mitigé. Nous avons gagné sur la résolution, mais perdu sur le niveau de bruit. Ce type de carte rapide avait une numérisation réduite, sur 8 bits au lieu de 12, ce qui a conduit à une augmentation importante du bruit de quantification. Tout en conservant la rapidité, de nouvelles cartes FPGA sont sorties en 2012 permettant de garder 12 bits de numérisation. Ces nouvelles cartes n'ont pas été utilisées durant cette thèse, mais ont déjà été acquises pour la prochaine version du système lidar.

La localisation et la détection des structures forestières ont été effectuées grâce aux algorithmes décrits dans le chapitre précédent. Les analyses ont montrées que la méthode gaussienne était plus adaptée car le rapport signal sur bruit a significativement diminué par rapport à celui qui était disponible durant l'expérience sur la forêt des Landes. Un exemple de profil est présenté sur la Figure 3.3b, on y voit la détection d'une structure forestière et de l'écho de sol.

3.2.2.1. Site de l'OHP – chêne blanc

Hormis les objectifs scientifiques du programme CANOPEE, l'étude conduite sur le site de chêne blanc nous a permis d'évaluer la capacité du lidar pour la restitution de structures forestières basses qui peuvent représenter une forêt en développement.

Le principal résultat que j'ai obtenu sur l'ensemble du site et de ses alentours est présenté sur la Figure 3.4 en haut. Comparativement à la vue aérienne en bas de la Figure 3.4, nous constatons un très bon accord dans la morphologie horizontale des structures forestières.

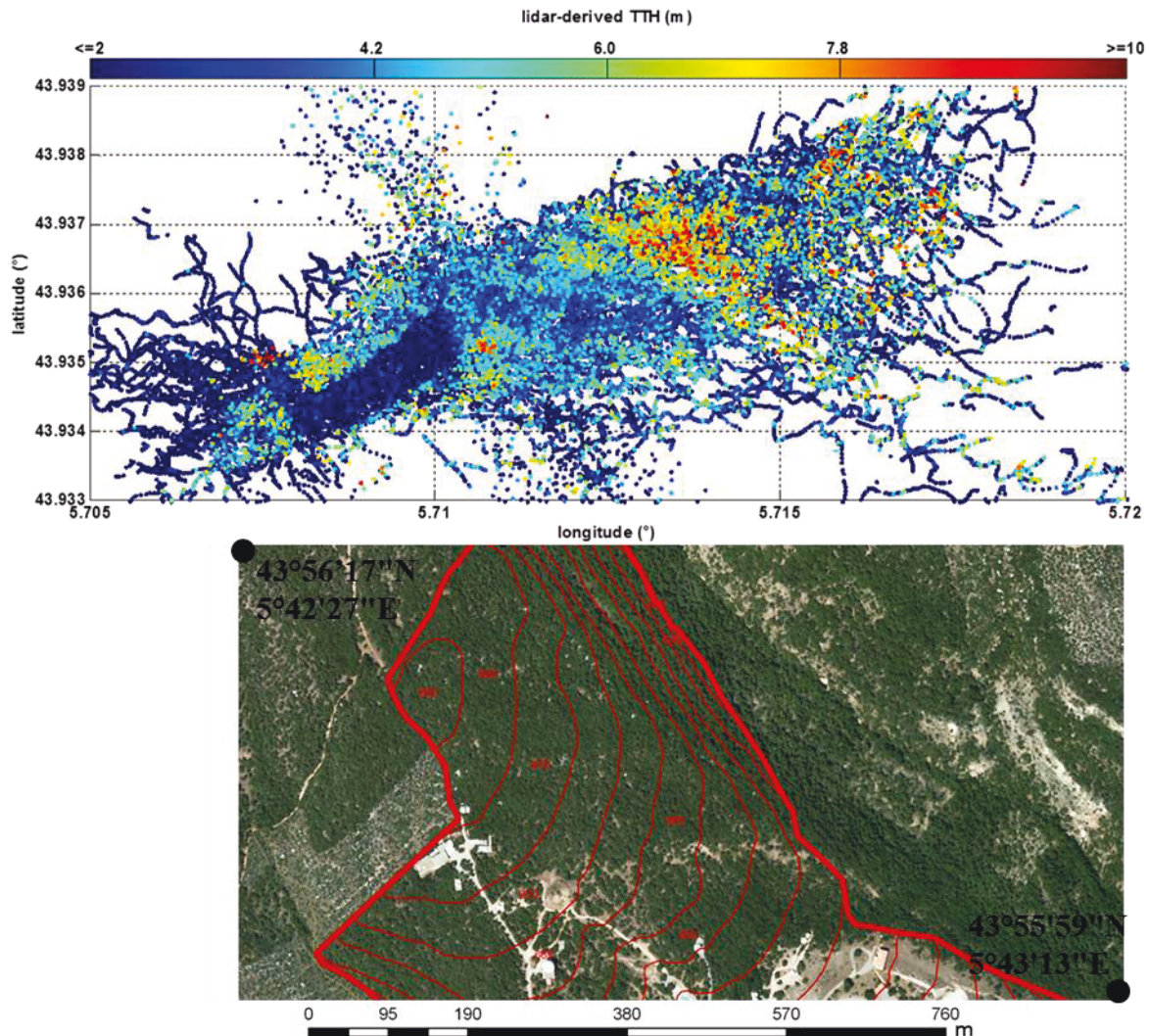


Figure 3.4. Haut : Les hauteurs des arbres (TTH) retrouvées pour chaque profil lidar au-dessus et aux alentours du site de l'OHP. Il n'y a pas de mesure dans les parties blanches. Bas : Vue de satellite (GoogleTM Earth) pour le même site (même échèle), où les traits rouges représentent les niveaux d'altitude.

Différentes structures horizontales sont observées qui représentent des zones avec des TTH variables associées à des arbres d'âges différents. La partie en jaune-rouge observée près de 5.713° de longitude est fortement influencée par la pente du terrain. Cet effet sera discuté précisément dans les sections 5.2 et 5.3.1 de chapitre 5.

L'OHP est sur une colline d'environ 660 m par rapport au niveau de la mer, les arbres sont d'environ 5-6 m de hauteur (Figure 3.5). Néanmoins, cette structure forestière est tout à fait intéressante pour enrichir la base de données lidar que nous utiliserons par la suite. De plus, même de faible hauteur, ces arbres sont des sources importantes de BVOC proches du bassin méditerranéen. Elles sont donc importantes à prendre en considération pour des cycles comme celui de l'ozone troposphérique qui est un acteur de premier plan dans les événements de pollution photo-oxydante. La restitution des hauteurs d'arbre sur le site de l'OHP est présentée sur la Figure 3.5, où la structure d'échantillonnage sol d'environ ~ 8 m de haut est facilement identifiable.

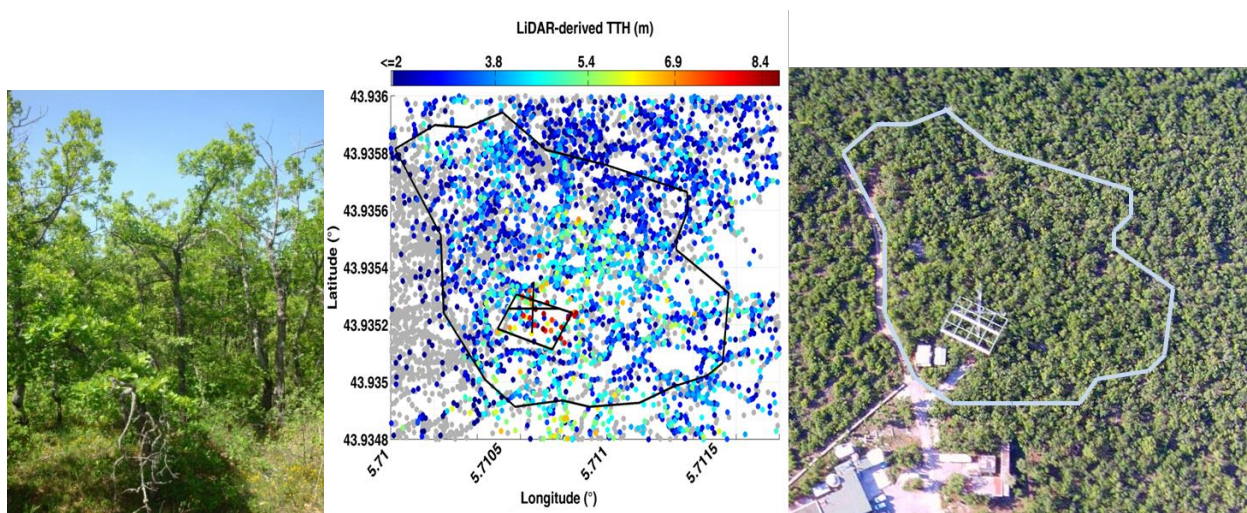


Figure 3.5. Gauche : Photo des chênes blancs sur le site de l'OHP. Milieu : Hauteurs des arbres sur le site de l'OHP, le contour du site d'étude et la structure de la tour sont en traits noirs. Droite : Photo aérien du site, le contour du site est superposé avec un trait cyan.

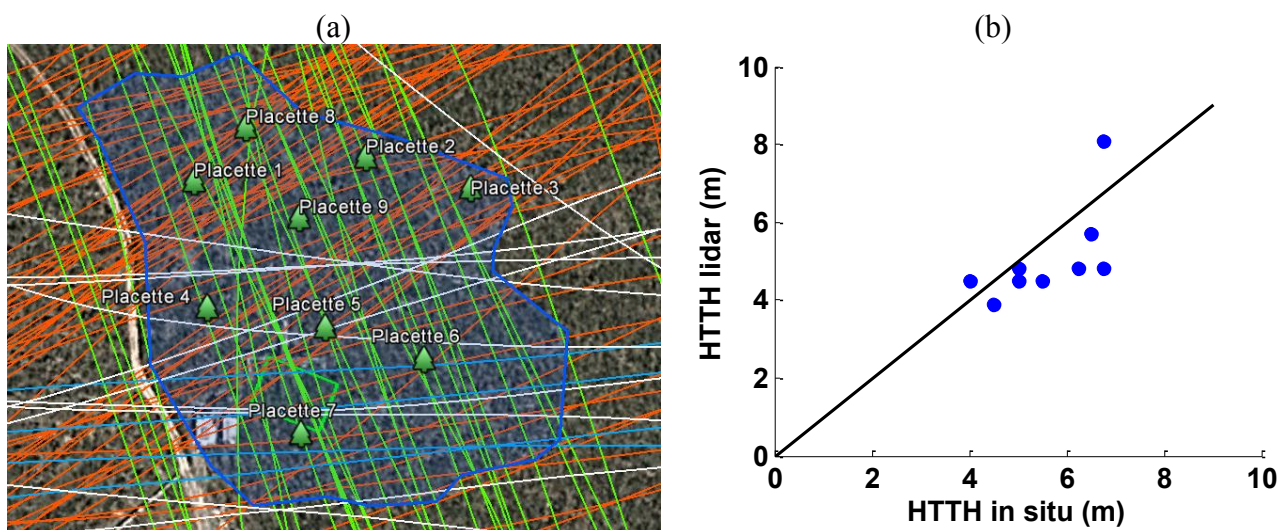
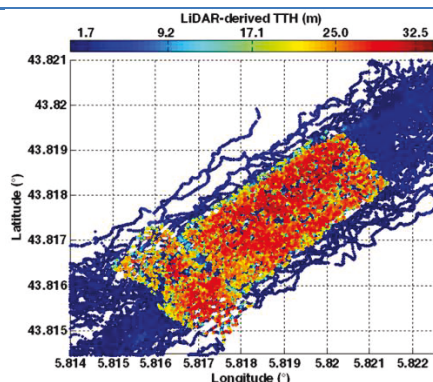
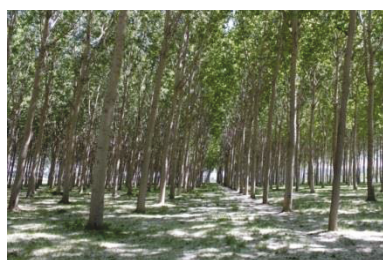


Figure 3.6. Gauche : Localisations des 9 parcelles (100 m^2 chacune) in situ. Les plans de vol sont affichés en couleur. Droite : Relation entre les HTTHs extraite par lidar et les relevés in situ dans chaque parcelle, le RMS est de l'ordre de 1 m.

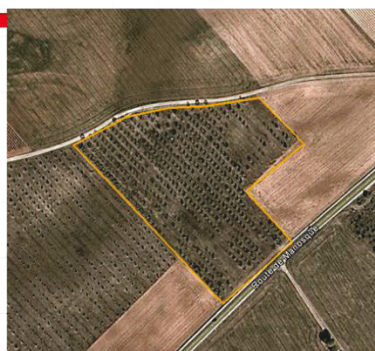
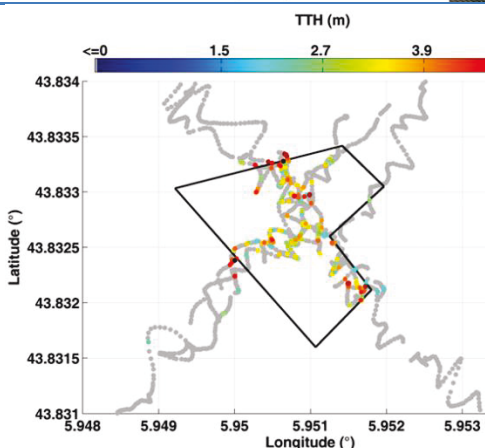
Nous avons également un bon accord avec les relevés sur le terrain que nous avons effectués. La hauteur d'arbre la plus haute dans une parcelle donnée (appelé « Highest Tree Top Height » (HTTH) en anglais) est utilisée pour la comparaison. Sur le site de l'OHP, HTTH a été mesurée de façon « *in situ* » (décrit dans le chapitre 2) dans 9 parcelles de 100 m² dont les localisations sont présentées sur la Figure 3.6a. La relation entre les HTTHs extraites des mesures lidar et des relevés *in situ* dans chaque parcelle montre un bon accord comme illustré sur la Figure 3.6b, le RMS est de l'ordre de 1 m, et elle est compatible à ce que nous avons noté sur les Landes.

3.2.2.2. Autres sites forestiers autour de l'OHP

Plantation de peupliers



Plantation d'amandiers



Plantation de pommiers

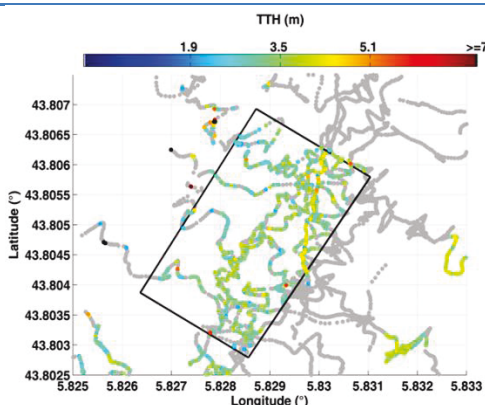


Figure 3.7. De gauche à droite : Photo, TTH lidar, Vue de satellite (GoogleTM Earth) pour les trois sites échantillonnés.

Durant la même période nous avons également effectué des mesures lidar aéroporté sur 3 autres sites autour de l'OHP. Ces expériences ont été conduites lorsque les conditions aérologiques n'étaient pas favorables au survol de l'OHP et sont venues compléter la validation des mesures lidar pour la

restitution des hauteurs d'arbre. Nous avons donc sélectionné des sites exploités recouverts d'arbres du même âge et donc de hauteurs comparables. En parallèle, ces mesures sont venues enrichir notre base de données de référence qui sera d'une grande utilité afin d'étudier par la suite le potentiel d'un système lidar embarqué sur plateforme spatiale.

PLANTATION DE PEUPLIERS

Cette plantation de peupliers est un site cultivé. Il est composé de 55 rangées d'arbres d'est en ouest et de 24 rangées du nord au sud. La distance moyenne, relevée sur le terrain, entre 2 rangées est ~ 7 -8 m. Les peupliers ont des hauteurs ~ 25 -30 m et il n'y a pas de sous-bois comme le montre la photo du site sur la Figure 3.7. Il n'y a donc pas de problème de la détection de l'écho du sol. Neuf arbres ont été mesurés et localisés, avec des hauteurs de 14 à 31 m. Une comparaison a été effectuée comme le montre sur la Figure 3.8 en superposant les hauteurs d'arbre *in situ* sur les histogrammes de hauteur d'arbre lidar, on voit bien que les hauteurs *in situ* sont dans la gamme des celles du lidar. Nous n'avons pas eu la possibilité de mesurer plus d'arbres en surface étant donné que nous ne disposions que d'une demi-journée pour conduire cette expérience complémentaire.

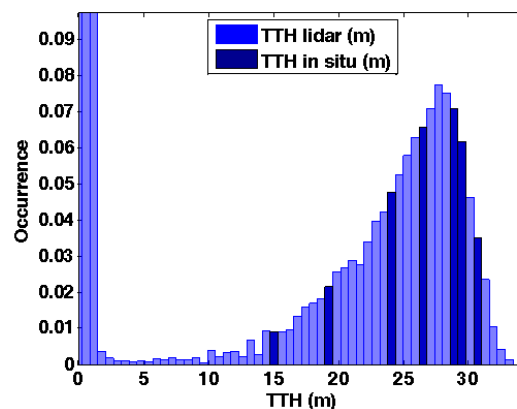


Figure 3.8. Histogramme de hauteur d'arbre extrait de la mesure lidar (bleu claire), les valeurs des hauteurs d'arbre à partir de mesures *in situ* sont superposées en bleu foncé.

PLANTATIONS D'AMANDIERS ET DE POMMIERS

Dans les sites exploités d'amandiers et de pommiers, les arbres ont tous à peu près la même taille qui correspond à la gamme de taille des chênes blancs du site de l'OHP. Sur ces 2 sites, la distance entre les arbres est assez grande, donc la détection de l'écho du sol sera toujours disponible.

La distance entre les amandiers a été relevée comme ~ 5 -7 m. Quatre arbres ont été mesurés avec des hauteurs de 5.1, 5.3, 5.4, 5.6 m. Ces hauteurs *in situ* correspondent bien aux hauteurs d'arbres retrouvées à partir de la mesure lidar (Figure 3.7). La distance entre les pommiers est du même ordre, ~ 5 m. Les pommiers étaient disposés sous des filets dont nous avons évalué la hauteur comme ~ 3.4 -3.8 m pour des hauteurs de pommiers ~ 3 m. A partir des mesures lidar, des résultats en parfait accord ont été retrouvés comme le montre la Figure 3.7.

L'ensemble de ces observations et les inter-comparaisons effectuées par rapport à des mesures au sol montrent à quel point la mesure de hauteur d'arbre par lidar aéroporté est fiable.

3.2.3. Forêt de Fontainebleau : représentative d'une forêt de moyenne-latitude

Les forêts échantillonnées jusqu'alors ne présentaient pas une forte densité de feuillage et l'approche lidar se devait d'être évaluée pour des feuillus denses, tout en conservant une référence sans feuille. La forêt de Fontainebleau se prête tout à fait à ce type d'étude. C'est une forêt de moyenne-latitude qui est représentative des forêts de chênes qui occupent environ 31% de la surface totale des forêts françaises. En outre, les chênes sont largement distribués en Europe, du centre de l'Espagne à la Norvège. La superficie forestière de Fontainebleau est ~17 000 ha, elle se situe à 6 km de Sud-Est de Paris (48°25' N, 2°40' E). Trois campagnes de mesures lidar aéroporté ont été conduites sur cette forêt en 2010, 2012 et 2013 pour des saisons différentes.

3.2.3.1. Barbeau – site bien documenté

Dans un premier temps, j'ai utilisé les données lidar acquises en novembre 2010 sur le site forestier de Barbeau situé au nord-est de Fontainebleau. Les mesures lidar ont couvert ~20 ha de forêt, dont 2.6 ha ont été bien documentés par l'Office National des Forêts (ONF) 5 ans auparavant. Un gros travail a été effectué sur ces données au cours de cette thèse ; il a fait l'objet d'un article à comité de lecture qui sera présenté dans la section 3.3.1. Dans un premier temps, nous présentons les études qui n'ont pas été incluses dans cet article.

La parcelle de Barbeau a une répartition des hauteurs d'arbre peu diversifiée car elle est principalement composée d'arbres arrivés à maturités. Elle est recouverte de chênes et de charmes en sous-étage. Les hauteurs d'arbres restituées sont montrées sur la Figure 3.9.

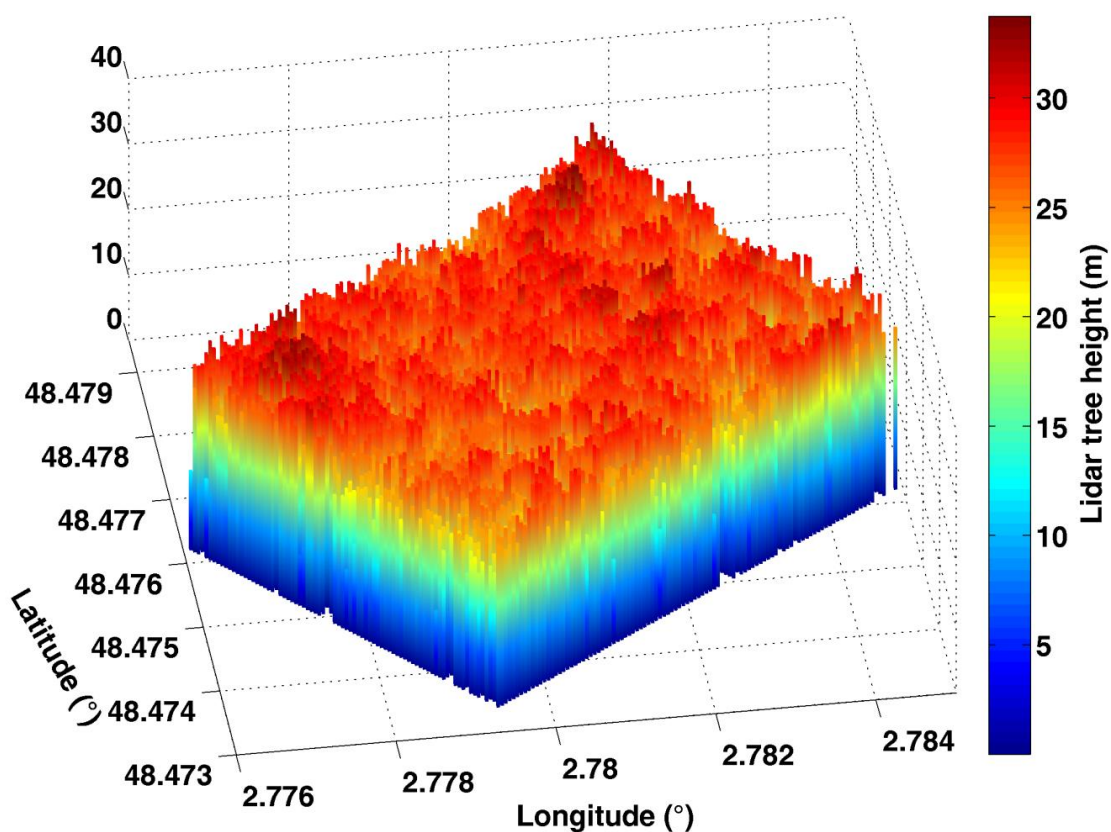


Figure 3.9. Visualisation 3D de la hauteur des arbres sur le site de Barbeau. La précision selon la verticale est de l'ordre de 1 m.

Afin de pouvoir comparer des mesures effectuées à 5 années d'intervalle, nous avons découpé le site central en 25 parcelles de $32\text{ m} \times 32\text{ m}$, dans chaque d'entre elle la hauteur de l'arbre la plus haute (HTTH) a été extraite des mesures lidar et des relevés *in situ*. Ceci assure de ne conserver que l'arbre dominant. Les localisations des arbres sont montrées dans la Figure 3.10a. Les arbres dominants retrouvés par les 2 méthodes ne sont pas localisés exactement au même endroit. Ceci peut être lié aux relevés GPS qui utilisaient, dans les deux cas, des instruments classiques (non différentiels) dont on sait que l'incertitude au sol est de l'ordre de 10 m. Par contre, si on compare les valeurs des hauteurs des arbres dominants, un bon accord est trouvé comme illustré sur la Figure 3.10b.

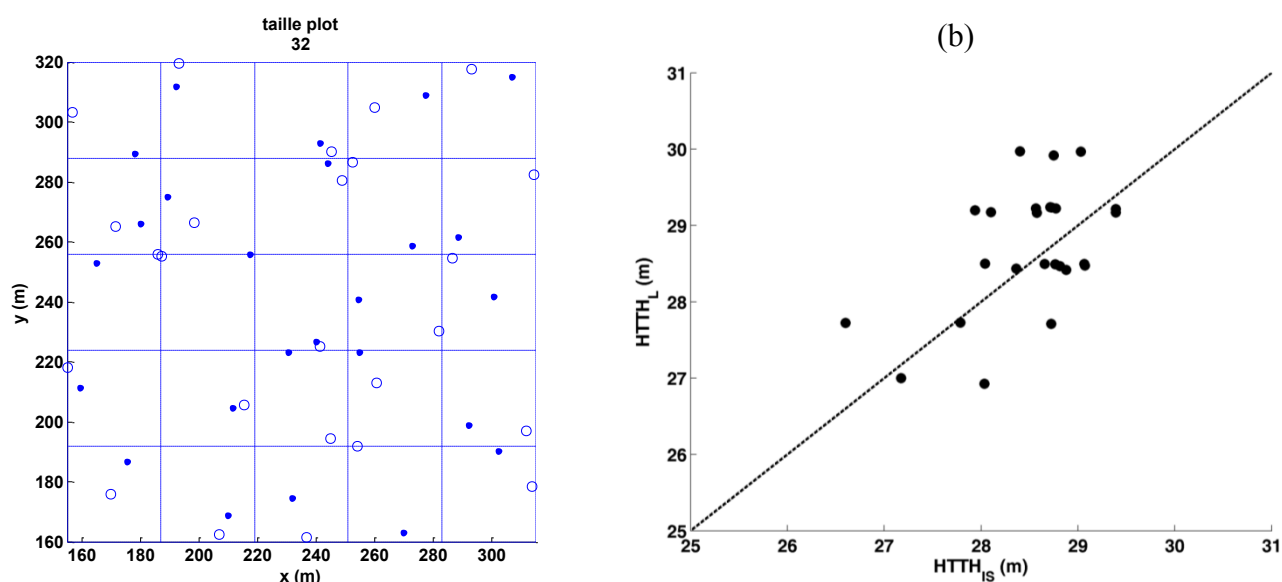


Figure 3.10. Gauche : Localisations des arbres dominants dans 25 parcelles de $32\text{ m} \times 32\text{ m}$ définies par les mesures *in situ* sont en point, celles définies par les mesures lidar sont en cercle. Droite : Relation entre les HTTHs extraite par lidar et les relevés *in situ* dans chaque parcelle.

CLASSIFICATION

L'utilisation de la méthode gaussienne, qui a été décrite dans le chapitre 2, permet de faire une première classification du type de couvert sur le site. C'est une information complémentaire à celle de la structure verticale de la canopée, tout en reposant sur cette dernière.

Les structures du couvert végétal à Barbeau ont été établies en 2004 par les forestiers de l'ONF ; leur classification est montrée sur la Figure 3.11 à gauche. Le nombre de modes gaussiens a été retrouvé dans chaque profil lidar sur l'ensemble du site. On peut considérer qu'un mode gaussien représente une couche d'arbre. Pour augmenter la représentativité, la valeur moyenne du nombre de modes pour tous les profils lidar dans une parcelle de $15\text{ m} \times 15\text{ m}$ a été utilisée, les résultats sont montrés dans la Figure 3.11 à droite. Par la mesure lidar, il a bien été retrouvé 3 classes typiques de structures horizontales qui correspondent bien aux celles observées à partir des observations *in situ* :

- 1) Taillis sous futaie, ou il y a toujours plusieurs couches verticales comme la futaie, le taillis, et le sous-bois. Cette structure est présentée comme les zones 1 et 1d par les observations *in situ* et comme supérieure à 2 modes par les mesures lidar.
- 2) Futaie, ou il y a souvent la futaie et le sous-bois. Cette structure est présentée comme les zones 2, 2b et 2d par les observations *in situ* et comme ~ 2 modes par les mesures lidar.
- 3) Taillis, ou la présence de sous-bois est plus rare. Cette structure est présentée comme les zones 3 par les observations *in situ* et comme ~ 1 mode par les mesures lidar.

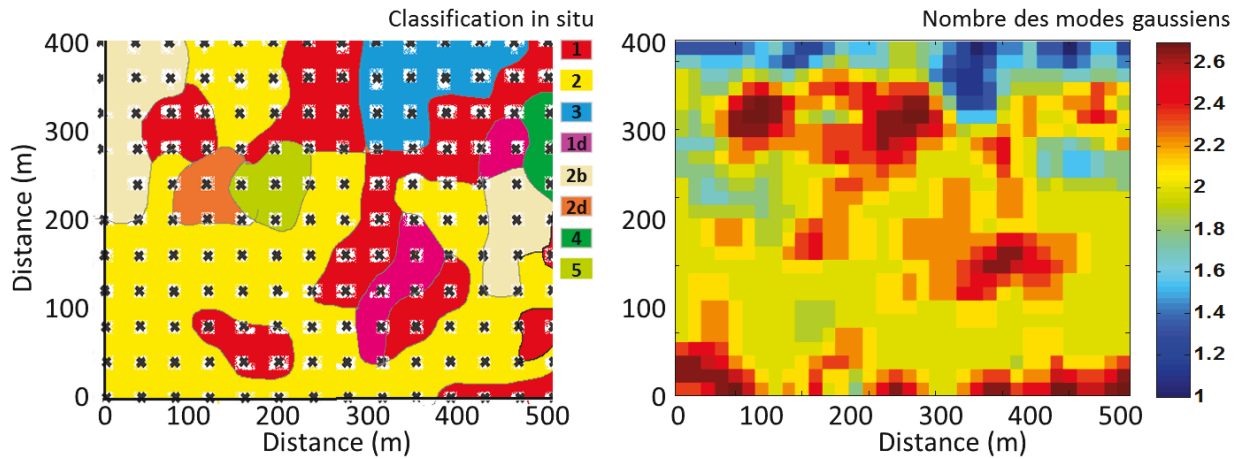


Figure 3.11. Gauche : Structure du couvert végétal in situ¹. Droite : La couleur dans chaque pixel représente le nombre moyen des modes gaussiens en prenant compte tous les profils lidar dans une parcelle de 15 m × 15 m.

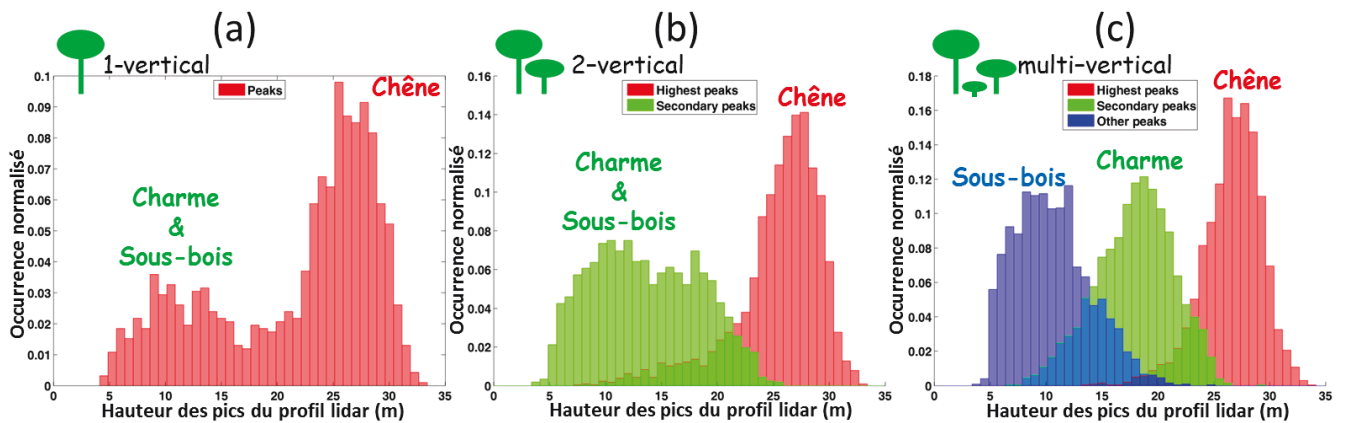


Figure 3.12. Histogrammes des hauteurs des couches identifiées par la méthode gaussienne pour les profils lidar : (a) ayant 1 nombre du mode, (b) ayant 2 nombres des modes, et (c) ayant plusieurs nombres des modes. Les barres bleues / vertes / rouges représentent le 1^{er} / 2^{ème} / 3^{ème} mode gaussien².

Afin de mieux comprendre les structures verticales retrouvées précédemment, la distribution des hauteurs d'arbres de chaque couche est mise en évidence. Les hauteurs de tous les modes gaussiens dans un profil lidar sont ainsi considérées séparément. Les résultats sont montrés sur la Figure 3.12. Le 1^{er} mode de distribution (en bleu) représente les charmes et le sous-bois, le second mode de distribution (en vert) représente le taillis de charmes et le 3^{ème} mode de distribution (en rouge) représente la futaie de chênes.

Ce travail exploratoire mériterait d'être validée plus amont sur d'autres sites, mais il était intéressant d'en présenter le principe ici, ainsi que les résultats prometteurs.

¹ Zone 1 : Taillis sous futaie typique. Zone 2 : Futaie de chênes. Zone 3 : Une zone de régénération. Zone 1d : Comme la zone 1 mais la densité des cépées de charme et plus faible. Zone 2b : Comme la zone 2 mais en dégradé. Zone 2d : Comme la zone 2 mais avec la présence de nombreux bouleaux. Zone 4 : le peuplement arborée ressemble à la zone 1, toutefois la densité des arbres semble plus faible. Zone 5 : Jeunes chênes avec des cépées de charmes élancées. Plus de information, contact Kamel Soudani.

² En légende : (a) : on ne considère que les profils lidar ayant 1 pic, donc il n'y a pas des « highest » ou « secondary » peaks. (b),(c) : une valeur dans les barres rouges représente la distance entre le premier pic et l'écho du sol d'un profil lidar. Une valeur dans les barres vertes représente la distance entre le 2ème pic et l'écho du sol. Une valeur dans les barres bleues représente la distance entre le 3ème (ou 4ème etc.) pic et l'écho du sol.

3.2.3.2. Fontainebleau – à grand échèle

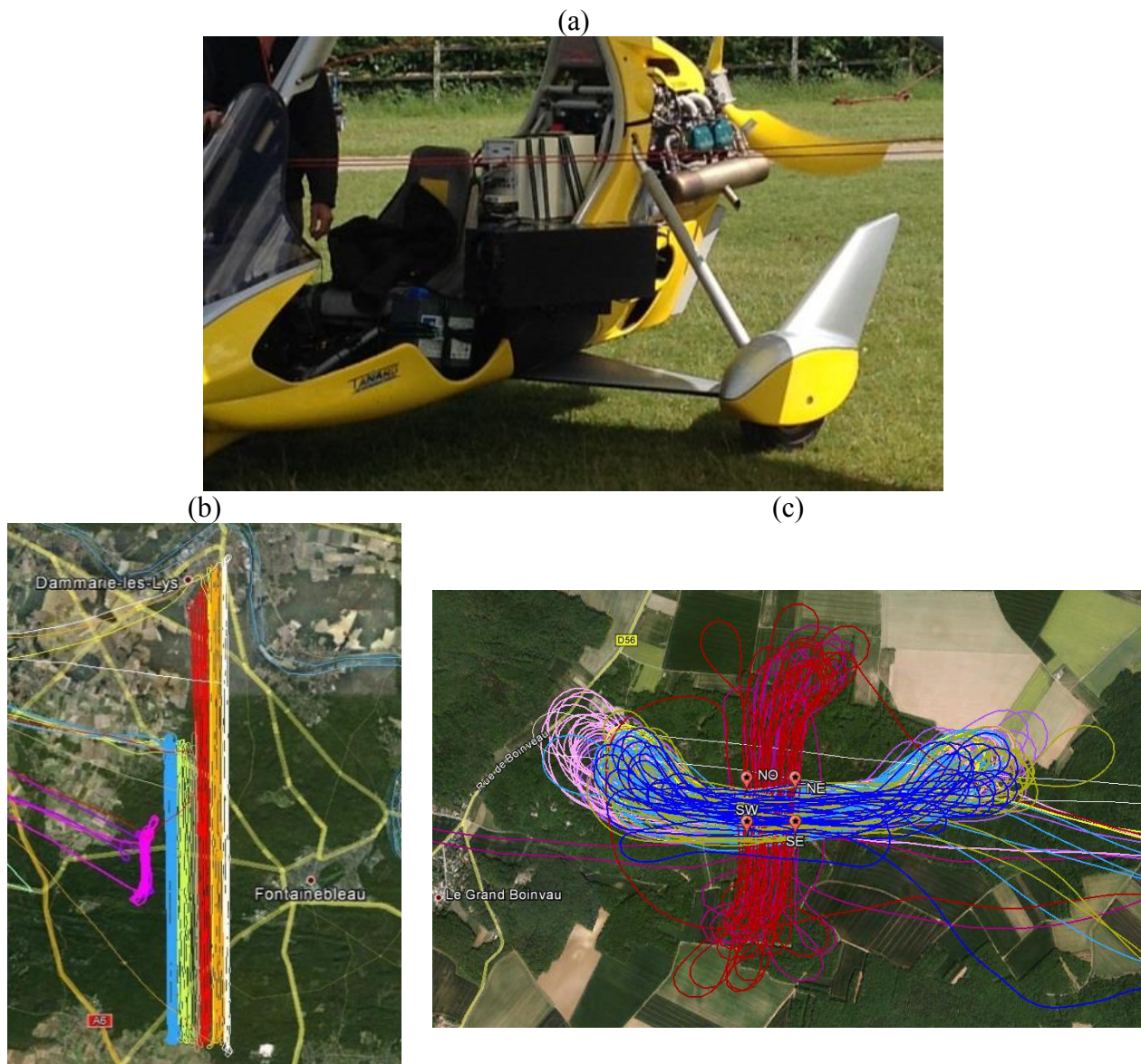


Figure 3.13. (a) Système lidar ULICE. (b) Plan de vol au-dessus de la forêt de Fontainebleau. (c) Plan de vol au-dessus de le site pour l'étude de la tache au sol.

En juillet 2012, j'ai participé à une expérience lidar au-dessus de la forêt de Fontainebleau. Cette expérience a été effectuée à une plus grande échelle et avait pour objectif de généraliser mes travaux sur la forêt. Evidemment, ces nouveaux échantillonnages sont venus compléter notre base de données. Ils pourront par ailleurs être utilisés par la suite afin de tester des approches d'assimilation par des modèles décrivant la croissance des arbres comme c'est le cas d'une des dernières versions du modèle ORCHIDEE (Bellassen et al., 2011a). Une nouvelle intégration du lidar canopée a été effectuée (Figure 3.13a) afin de corriger des problèmes rencontrés sur la stabilité de l'émission lors des précédentes campagnes. Suite à cela, le lidar a été utilisé pour échantillonner une grande partie de la forêt de Fontainebleau. L'expérience a été conduite sur 2.5 semaines sous des conditions météorologiques défavorables (orages violents) qui ont limité notre capacité d'échantillonnage horizontal. Nous avons néanmoins échantillonné une partie significative de la forêt comme le montre la Figure 3.13b.

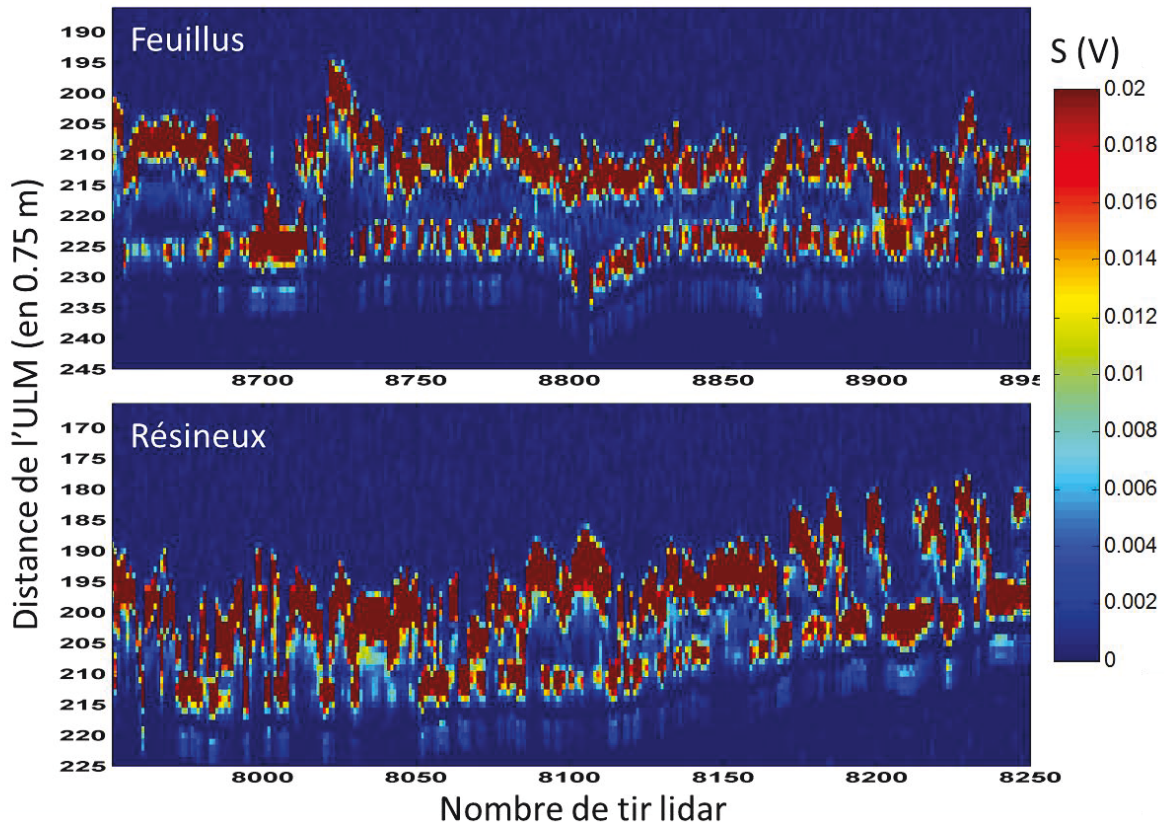


Figure 3.14. Exemples des profils lidar (200 profils), pour les Feuillus en haut et les Résineux en bas, dans la forêt de Fontainebleau.

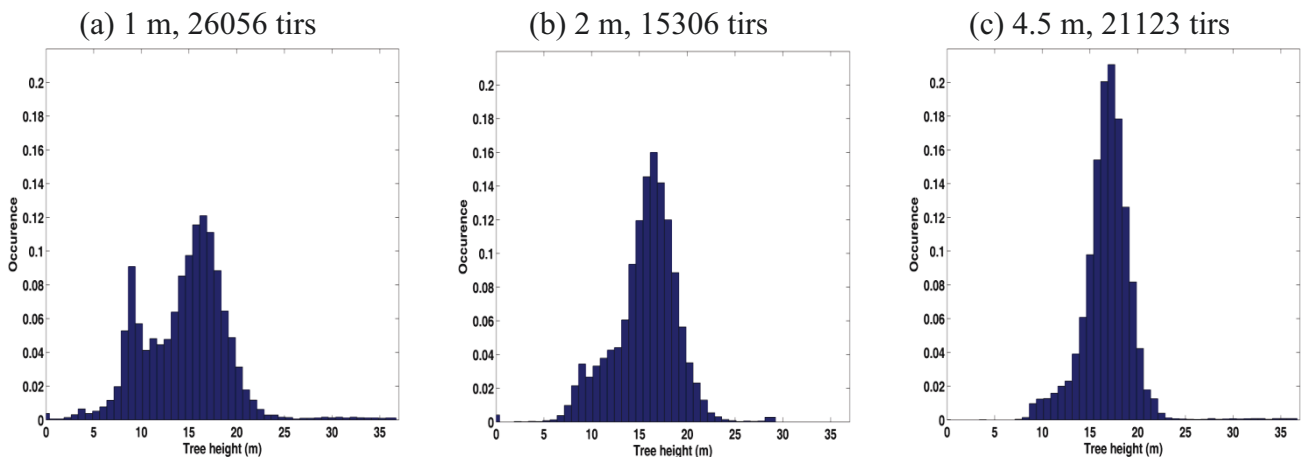


Figure 3.15. Histogrammes des hauteurs d'arbres (m) sur la même zone de référence pour des mesures lidar ayant différentes tailles d'empreinte du laser au sol : de gauche à droite 1, 2 et 4.5 m en diamètre. Les nombres de profils lidar disponibles pour chaque cas sont donnés en bas.

Suite aux premières études que j'ai conduites sur les données lidar de Fontainebleau, nous avons constaté que la détection de l'écho du sol n'est pas toujours disponible en présence de chênes en période estivale. En effet, le faisceau laser n'arrive pas de traverser les canopée à cause de la couverture de feuilles qui est très dense durant l'été. Dans la Figure 3.14, les exemples de profils lidar dans 2 sites du Fontainebleau sont montrés. On voit bien qu'il y a un problème de pénétration du laser. Il faut également noter que nous avons également survolé des zones peuplées de résineux (pin sylvestres) et que la détection n'en reste pas moins difficile. La difficulté provient du fait que la taille de l'empreinte du laser au sol utilisée durant cette expérience était probablement trop petite (~2 m).

Nous étions limités par l'acceptance angulaire à la réception. Une modification sur le terrain du diaphragme d'entrée nous a permis de relâcher quelque peu cette contrainte.

Afin d'étudier l'impact de la taille d'empreinte du laser au sol, et ainsi comprendre l'effet des feuilles, des échantillonnages spécifiques ont été conduits pour des tailles d'empreinte de 1, 2 et 4.5 m sur une zone référente en effectuant 9 vols distincts. Le cumul des traces au sol de ces plans de vol est montré sur la Figure 3.13c. Les hauteurs d'arbres de chaque profil lidar ont été retrouvées et elles ont permis de tracer les histogrammes de la Figure 3.15. En utilisant de faisceau laser de taille de 1 m, on est plus sensible aux petites structures, mais on doit également moins atteindre le sol. En utilisant de faisceau laser de taille plus grande (4.5 m), on est plus sensible aux grandes structures, mais on atteint plus souvent le sol.

En fait, les hauteurs extraites à partir des mesures lidar peuvent être des « pseudo-hauteurs » à cause des fausses détections des échos du sol. Pour conclure, il nous a donc fallu effectuer des mesures, au-dessus du même site, lorsque les arbres sont sans feuilles. Afin de disposer de données proches de la réalité terrain, une nouvelle expérience a donc été effectuée en mars 2013 sur la même zone de référence.

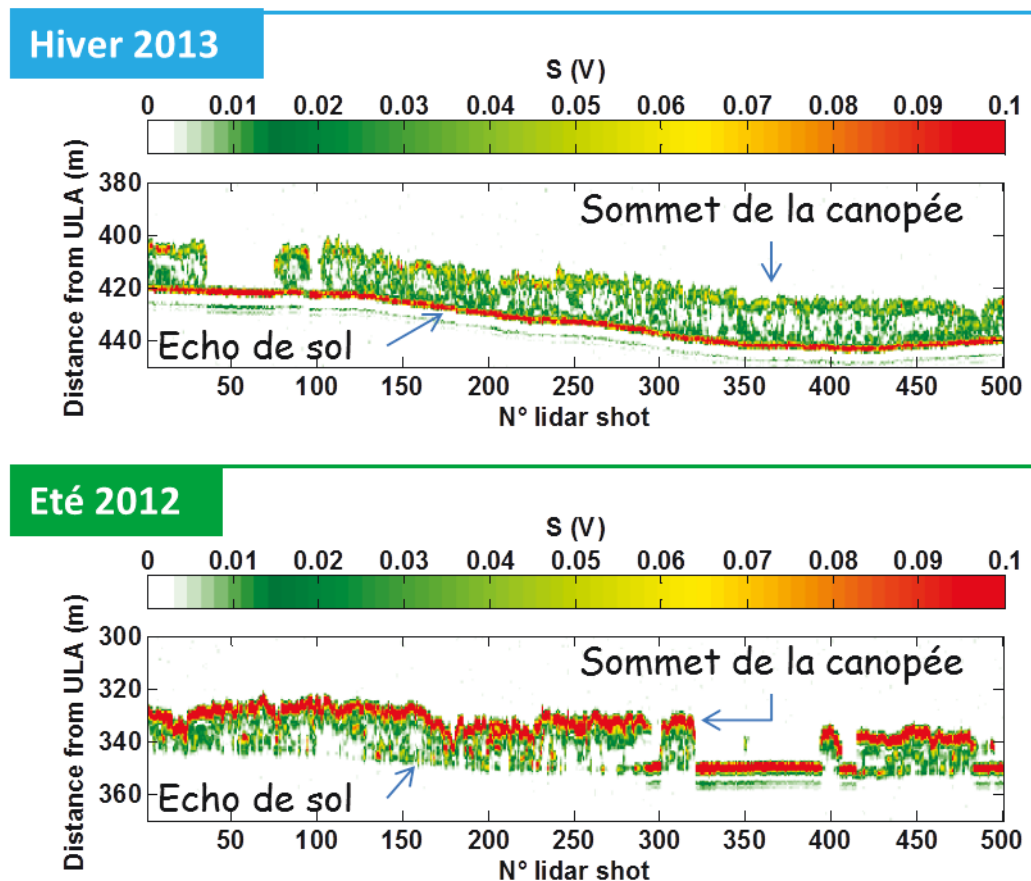


Figure 3.16. Exemple des profils lidar (500 profils, avec diamètre d'empreinte laser de 2 m), durant l'hiver (en haut) et l'été (en bas), sur la même zone dans la forêt de Fontainebleau. Les couleurs représentent d'intensité du signal lidar. Les niveaux du sol se situent en bas avec les réponses des canopées au-dessus.

Pour disposer de moyens d'inter-comparaison, trois types de données lidar sont considérés : deux séries de mesures durant l'été quand des arbres avaient de feuilles avec des diamètres d'empreinte laser de 2 et de 4 m, et une série de mesures durant hiver quand des arbres n'avaient pas de feuille avec un

diamètre d’empreinte laser de 2 m. Un exemple de mesures brutes est donné sur la Figure 3.16. Durant l’hiver, il n’y a pas de problème de la pénétration du laser dans le couvert forestier. Sur les profils lidar durant l’hiver, dans la partie haute de la Figure 3.16, on voit un trait rouge continu qui représente les échos du sol. Alors que durant l’été, la détection de l’écho du sol n’est pas toujours disponible. Pour les profils lidar durant l’été, dans la partie basse de la Figure 3.16, on peut observer de nombreux « trous » à la place des échos du sol.

Les comparaisons entre ces 3 jeux de données montrent que les hauteurs d’arbres restituées sont similaires. Ceci est bien évident sur les histogrammes de TTH de la Figure 3.17. Les hauteurs retrouvées durant hiver sont légèrement plus petites, probablement en raison de l’absence de feuilles. Néanmoins, en regardant les profils verticaux lidar de la Figure 3.17, nous constatons que les structures verticales sont très différentes pour les deux saisons. La réponse de la canopée est beaucoup plus grande durant l’été qu’en hiver, c’est la réponse du sol qui devient dominante sur les profils lidar en hiver.

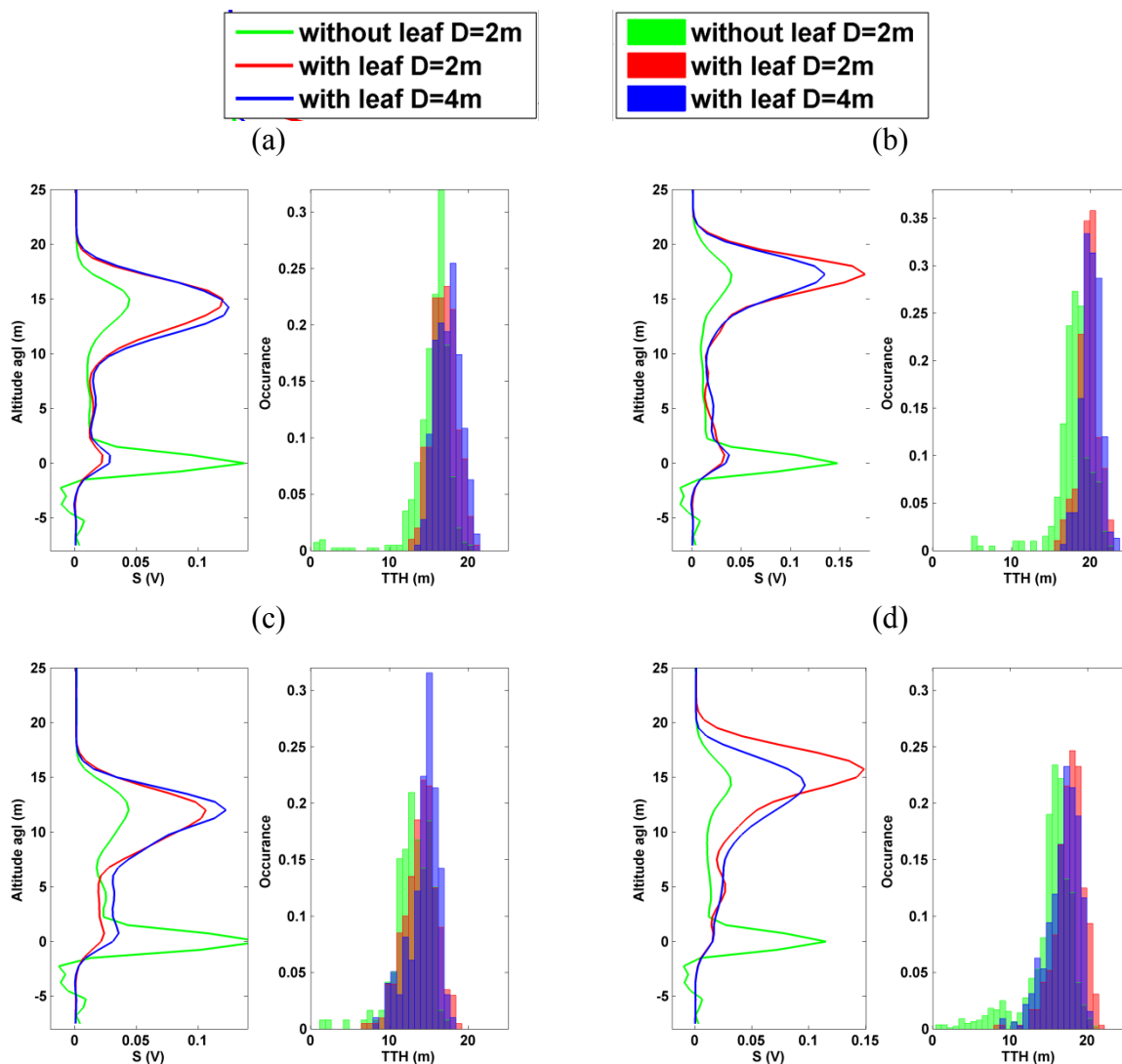


Figure 3.17. Exemples de profils lidar moyennés (Gauche) et Histogrammes des hauteurs d’arbres (Droite) dans 4 petites sous-zones (a) – (d) de tailles 20 m × 20 m, qui ont été choisies de façon aléatoire dans la zone étudiée. Les données obtenues durant l’hiver quand des arbres n’avaient pas de feuilles sont en vert, le diamètre d’empreinte laser associé est de 2 m. Les données obtenues durant l’été quand les arbres avaient des feuilles sont en rouge (diamètre d’empreinte laser = 2 m) et en bleu (diamètre d’empreinte laser = 4 m).

Par conséquent, l'étude de hauteurs d'arbres n'est pas suffisante pour bien connaître un site forestier, il faut prendre en compte les structures verticales internes de la forêt. Elles peuvent être étudiées par les mesures lidar en introduisant un paramètre caractéristique qui sera présenté dans la prochaine section.

3.3. Hauteur quadratique moyenne (QMCH) – Biomasse

La hauteur quadratique moyenne, quadratic mean canopy height (QMCH) en anglais, qui caractérise la structure interne de forêt, est une hauteur pondérée incluant toutes les structures verticales dans un profil lidar. Le calcul de la QMCH a été présenté dans la section 2.3.2.4 du chapitre 2. L'utilisation de ce paramètre permet de quantifier la quantité de biomasse aérienne (Lefsky et al., 1999b). Dans la section 3.3.1 je présente tout d'abord une publication à comité de lecture publiée dans la revue internationale « Forests ». Cette publication montre la méthodologie utilisée et le bilan d'erreur associé pour la restitution de la quantité de biomasse aérienne. Le site étudié est celui de Barbeau qui a été présenté précédemment (c.f. 3.2.3.1). En second lieu, dans la section 3.3.2, j'apporterai quelques compléments à l'étude présentée dans mon article.

3.3.1. Article: Interest of a Full-Waveform Flown UV Lidar to Derive Forest Vertical Structures and Aboveground Carbon

Article

Interest of a Full-Waveform Flown UV Lidar to Derive Forest Vertical Structures and Aboveground Carbon

Xiaoxia Shang * and Patrick Chazette

Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement, Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives—Centre National de la Recherche Scientifique—Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Gif sur Yvette Cedex 91191, France; E-Mail: patrick.chazette@lsce.ipsl.fr

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: xiaoxia.shang@lsce.ipsl.fr; Tel.: +33-1-6908-7889; Fax: +33-1-6908-7716.

Received: 12 December 2013; in revised form: 22 April 2014 / Accepted: 10 June 2014 /

Published: 20 June 2014

Abstract: Amongst all the methodologies readily available to estimate forest canopy and aboveground carbon (AGC), *in-situ* plot surveys and airborne laser scanning systems appear to be powerful assets. However, they are limited to relatively local scales. In this work, we have developed a full-waveform UV lidar, named ULICE (Ultraviolet Lidar for Canopy Experiment), as an airborne demonstrator for future space missions, with an eventual aim to retrieve forest properties at the global scale. The advantage of using the UV wavelength for a demonstrator is its low multiple scattering in the canopy. Based on realistic airborne lidar data from the well-documented Fontainebleau forest site (south-east of Paris, France), which is representative of managed deciduous forests in temperate climate zones, we estimate the uncertainties in the retrieval of forest vertical structures and AGC. A complete uncertainty study using Monte Carlo approaches is performed for both the lidar-derived tree top height (TTH) and AGC. Our results show a maximum error of 1.2 m (16 tC ha⁻¹) for the TTH (AGC) assessment. Furthermore, the study of leaf effect on AGC estimate for mid-latitude deciduous forests highlights the possibility for using calibration obtained during only one season to retrieve the AGC during the other, by applying winter and summer airborne measurements.

Keywords: airborne lidar; full-waveform UV lidar; forest vertical structures; aboveground carbon; uncertainty study

1. Introduction

Deforestation or degradation of forest accounts for about 20% of total global emissions of carbon dioxide (CO₂) and thus significantly contributes to climate change [1]. Gibbs *et al.* [2] pointed out that the majority of carbon is sequestered in aboveground live tissues (e.g., trees). A strong relationship between the stand height and the stand biomass occurs [3], which highlights the need to develop tools for the assessment of tree height at the global scale. Traditionally, the aboveground biomass (AGB, in g ha⁻¹) and the aboveground carbon (AGC, in gC ha⁻¹, based on the biomass to carbon conversion factor 0.5) have been assessed using field-based inventory plots and from aerial photography. More recently, airborne (e.g., [4–7]) or spaceborne (e.g., [8–13]) lidar systems have demonstrated the possibility to characterize the three-dimensional distribution of biomass elements of forest canopies and, furthermore, to estimate the AGB or AGC. Moreover, IPCC [1] provided guidelines to assist countries in the development of carbon-assessment methodologies, amongst which lidar is a powerful candidate to monitor forests at both regional and global scales. The recent publication of Zolkos *et al.* [14] concluded that lidar metrics may be significantly more accurate than those using radar or passive optical data; hence, the establishment of relationships between forest stand attributes and lidar measurements is a pertinent approach with which to assess the AGB or AGC over a wide range of spatial scales (e.g., [15]). Nevertheless, the complementarity between lidar and radar could be an advantage when designing a space mission because they are neither sensitive to the same biomass account nor based on the same interaction between the emitted radiative wave and the forest. The use of a P-band radar by the European Space Agency (ESA) [16] opens a new perspective for the conduct of forest surveys from space and could be further improved by a synergy with lidar measurements.

Airborne laser scanning systems appear to be powerful assets for forest studies. However, they are limited to relatively local scales. Airborne measurements using a large-footprint lidar are more promising for studies of forest landscapes at larger scales [17]. We have developed such a lidar system to meet the need of an airborne demonstrator for possible future space missions, with an eventual aim to retrieve the forest properties at the global scale. This article is mainly dedicated to the data analysis approach with which to measure both the forest vertical structures and the AGC, and to the assessment of the relative uncertainties involved in this. It is based on measurements performed by a full-waveform ultraviolet (UV) airborne lidar over a deciduous mid-latitude forest, which has been selected to give realistic and representative samples. The synergy between multispectral measurement instruments, radar and lidar could further improve the uncertainties presented here, but this is beyond the scope of the present work.

The description of the instrumental setup and the experimental strategy is given in Section 2. In Section 3, we present algorithms developed for the retrieval of the tree top height (TTH) and the quadratic mean canopy height (QMCH) from the full-waveform UV lidar profiles. We also show how the lidar has been calibrated and applied for constituting a realistic sampling of the AGC at a spatial resolution compatible with the forest stand scale. In Section 4, the results and main uncertainty sources are fully discussed. The effect of leaves on both the forest vertical structures and the AGC are also discussed in Section 4.

2. Instrumental Set-Up and Strategy

The new custom-built ultraviolet (UV) lidar ULICE (Ultraviolet Lidar for Canopy Experiment) payload was embedded on an Ultra-Light Aircraft (ULA) to allow rapid deployments and flight plans flexibility over the sampling sites. This system is an airborne prototype for future space missions designed to study forests at the global scale and has been specially developed for these demonstration experiments. Compared to the near infrared (NIR) lidar systems that are generally considered for canopy studies, the use of the UV spectral domain leads to a significant reduction of the multiple scattering effect within the forest structures, because of the lower reflectance by the vegetation at these wavelengths [18]. Considering a spaceborne lidar mission, the use of UV will lead to disadvantages due to atmospheric transmission, since the atmospheric optical thickness at UV wavelengths is about five times larger than at NIR wavelengths. However, increasing the emitted laser energy can compensate for this attenuation. Besides, this drawback is negligible for our low-altitude airborne lidar measurements because the atmospheric transmission is close to 0.98. Hence, an airborne UV lidar is a good candidate to be a reference for a spaceborne lidar.

It should be mentioned that two space missions will board a UV lidar in the near future: (1) The ESA (European Space Agency)/JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) mission EarthCare (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer) will board an Atmospheric Lidar (ATLID) [19,20]; (2) The ESA mission ADM-Aeolus (Atmospheric Dynamics Mission Aeolus) will board the Atmospheric Laser Doppler Instrument (ALADIN) [21,22].

2.1. ULA Carrier

The ULA used in this study is a pendular ULA model Tanarg 912S with BioniX 15 wings manufactured and marketed by the Air Creation company ([23], Table 1). It is equipped with a Rotax 912S100-hp motor with a 72 dB noise impact at 150 m from the surface and full power (Figure 1). It is also equipped with a VHF radio with a bandwidth of 25 kHz and Mode *S* transponders. During this study it flew at about 300 m above ground level (agl) with a velocity of $\sim 20 \text{ m s}^{-1}$. This carrier has been selected because of its flexibility to perform lidar measurements over small and medium areas [24]. It also has the capability to take off from small airfields. The ULA maneuverability provides the ability to quickly double-back above the same site, and therefore make an exhaustive horizontal sampling. It is a good candidate to collect the required data set, and so perform a comprehensive demonstration study on forest properties derived from a full-waveform UV lidar.

Table 1. Main characteristics of the ULA ^a.

Characteristics	Details
Maximal scientific payload	120 kg
Flight speed	17 to 40 m s^{-1} (62 to 144 km h^{-1})
Endurance	4 h at 20 m s^{-1} (3 h at 40 m s^{-1})
Gross weight	450 kg
Flight altitude	between 0.2 and 5.8 km agl
Climb rate	6.5 m s^{-1}
Electric supply (2 \times 12 V batteries)	24 V/ \sim 400 W

^a ULA, Ultra-Light Aircraft.

Figure 1. ULICE (Ultraviolet Lidar for Canopy Experiment) onboard an ULA (Ultra-Light Aircraft). The lidar optical head is shown on the left picture. The top right picture shows a global view of the lidar embedded on the ULA. The bottom right picture shows the lidar in flight during the experiment, with the optical head pointing downward.



2.2. Scientific Payload

The main instrument is the homemade canopy lidar ULICE (Figure 1), which has been developed by LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement, France) for scientific studies. ULICE operates at eye-safe conditions from the emission of the optical head. It uses a Centurion laser (a diode-pumped Nd-YAG solid state laser) manufactured by the Quantel company [25], operating at 355 nm and delivering 7 mJ energy in 6 ns at the pulse repetition frequency (PRF) of 20 Hz (Table 2). At the 20 m s^{-1} ULA flight speed, the successive lidar shot centers are separated by $\sim 1 \text{ m}$. The laser energy is deliberately oversized, which is compensated by optical densities ($\text{OD} = 3.7$) at the reception, in order to reduce the contribution of the sky radiance. The full-waveform lidar signal is digitized at a 200 MHz sampling frequency by a high-speed digitizer card NI-PXI-5124 manufactured by the National Instruments Company [26]. This yields a 0.75 m sampling resolution along the lidar line of sight, well adapted for a mid-latitude forest of 20~30 m in height.

The laser beam is emitted downwards to the forest in the near nadir direction ($<10^\circ$ from nadir). Small-footprint results in a higher PRF, while large-footprint systems increase the probability to hit both the ground and the canopy top simultaneously. Our footprint diameter was a compromise value between the small- and large-footprint diameters as in Cuesta *et al.* [6]. The beam divergence of the lidar was set up to 4 mrad, yielding to laser footprints at ground level of $\sim 2 \text{ m}$ in diameter. The TTH retrieval using such a footprint size is hardly influenced by the surface slopes encountered at the sampling sites.

Table 2. Characteristics of the ULICE ^a.

Characteristics	Details
Wavelength	355 nm
Mean energy per pulse	~7 mJ
Pulse repetition frequency (PRF)	1–100 Hz
Pulse duration	~6 ns
Beam diameter	20 mm
Diameter footprint at a flying altitude of 300 m agl	2.20 m
Reception diameter	150 mm
Reception optical density (OD)	3.7
Filter bandwidth	0.3 nm
Field of view	~4 mrad
Detector	Photomultiplier
Detection mode	Analog
Vertical sampling	0.75 m
Weight of the optical head	~20 kg
Weight of the electronics	~15 kg
Electric supply (2 × 12 V batteries)	24 V/~400 W

^a ULICE, Ultraviolet Lidar for Canopy Experiment.

An ancillary positioning instrument, called the MTi-G system, and manufactured by the XSSENS company [27] is also onboard the ULA (Table 3). It provides the position and the attitude information of the ULA (Euler angles: yaw, pitch and roll) necessary to derive the angle between the actual lidar line of sight and the nadir direction. The Global Positioning System (GPS) and the Attitude and Heading Reference System (AHRS) are part of the MTi-G system. The 20-Hz GPS measurements tracked the ULA position with an accuracy of 5 m (MTi-G leaflet, [27], Table 3). The AHRS consists of sensors on three axes that provide the three Euler angles with 0.7° accuracy (*i.e.*, 3.6 m at the ground for a flight altitude of 300 m agl). A discussion on the influence of the lidar footprint position and its associate uncertainties will be presented later.

Table 3. Technical specifications of the ancillary instrument (MTi-G).

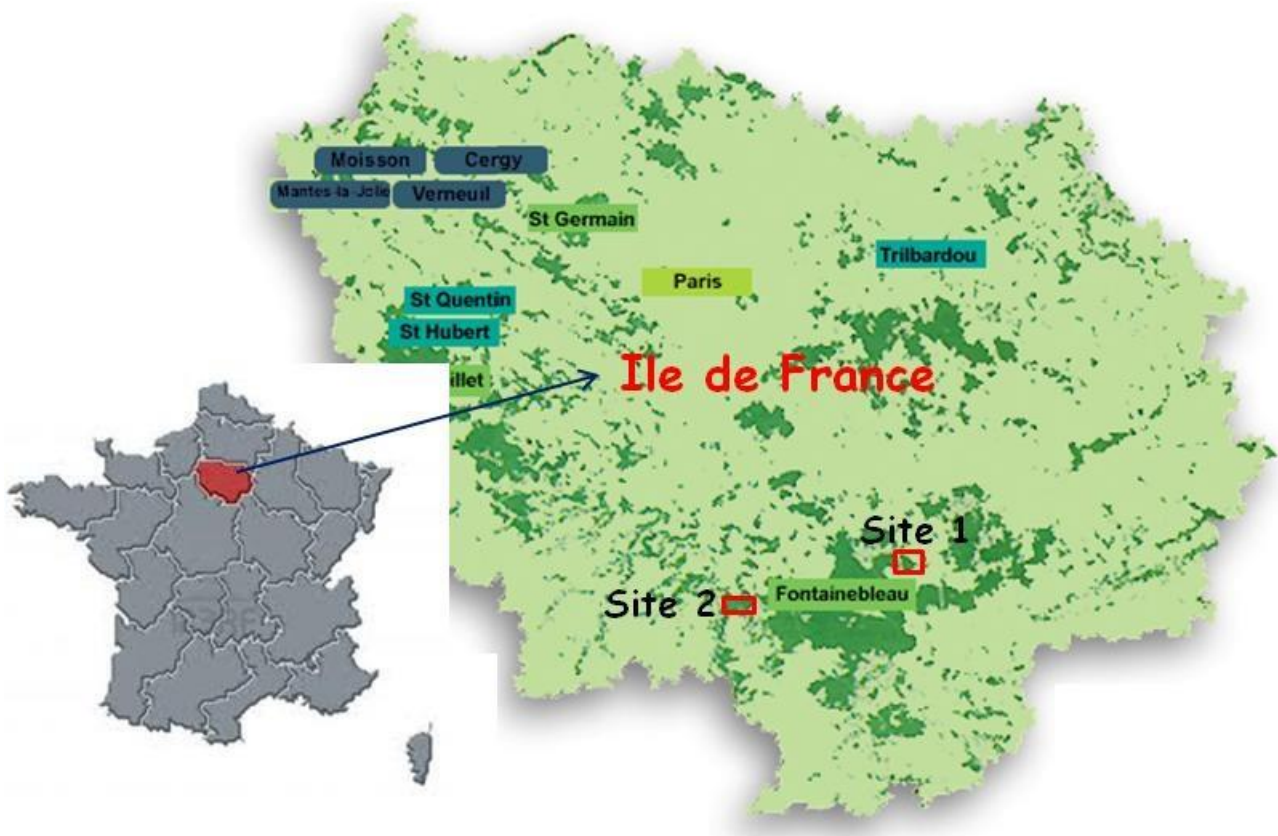
Characteristics	Details
<i>GPS</i>	
Receiver type	50 channels L1 frequency; C/A code Galileo L1; Open Service
GPS update rate	4 Hz
Start-up time cold start	29 s
Tracking sensitivity	−160 dBm
Timing accuracy	50 ns RMS
<i>AHRS</i>	
Static accuracy (roll/pitch)	<0.5 deg
Static accuracy (heading)	<1 deg
Dynamic accuracy	1 deg RMS
Angular resolution	0.05 deg
Dynamic range:	
-Pitch	±90 deg
-Roll/Heading	±180 deg

2.3. Forest Sites and Sampling Strategy

The main challenge for forest studies at the global scale is the AGC assessment. Tropical forests are known as the main reservoir of carbon and are difficult to penetrate by laser beam due to their high density. For this initial scientific study we did not have the opportunity to perform airborne measurements over such a tropical forest. Thus, deciduous forests in France have been sampled for a first test of the UV lidar interest.

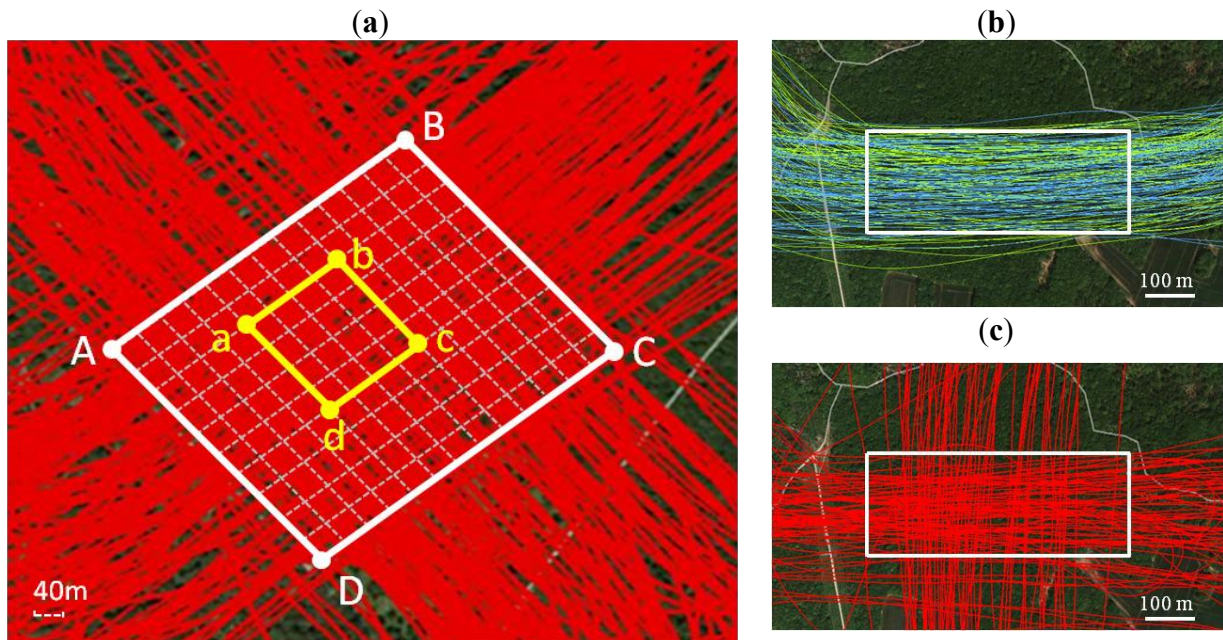
We performed airborne lidar experiments over the deciduous forest of Fontainebleau. This forest of ~17,000 ha ($48^{\circ}25' \text{ N}$, $2^{\circ}40' \text{ E}$) is located 60 km south-east of Paris (Figure 2). It is a managed mature oak forest with a dense understory of coppiced hornbeams. It is well documented by the Office National des Forêts (ONF, [28]). Fontainebleau is representative of the managed oak that occupies about 31% of the total surface of French forests. Moreover, oaks are widely distributed from central Spain to Norway in Europe. The forest is of flat topography and lies at ~120 m above mean sea level (amsl). The climate is temperate, subject to the influence of both oceanic effects from the west and continental effects from the east. The mean annual temperature is 10.6°C and the mean annual rainfall is 750 mm [29].

Figure 2. Location of the sampling sites, both of them site in the Fontainebleau Forest ($48^{\circ}25' \text{ N}$, $2^{\circ}40' \text{ E}$, south-east of Paris) in the region of Ile de France of France (map of forest areas from: [30]). Site 1 is close to the northeastern part of the Fontainebleau forest, Site 2 at the western end.



Two sampling sites were selected inside the Fontainebleau forest for a total of 30 days of measurements. Site 1, of ~20 ha (Figure 2), was first sampled during the winter of 2010, in order to avoid signal attenuation by canopy leaf strata and the effects of the ground cover vegetation. An exhaustive horizontal sampling was performed (Figure 3a) for comparison with detailed field measurements made by ONF five years previously (2005) over an area of 2.6 ha in the middle of the site. Site 2, of ~11 ha, (Figure 2, Figure 3b,c) was sampled both during summer 2012 and winter 2012–2013, so as to study the leaf effect on estimates of both the forest vertical structures and the AGC. This site was not subject to any harvesting between our two lidar experiments.

Figure 3. Flight tracks superimposed in color over the sampling sites (Google™ Earth). (a) Site 1 is at the crossing of winter 2010 flight tracks within the white rectangle ABCD. The well-documented central area is highlighted in the yellow rectangle abcd. The forest plots of 40 m × 40 m are bounded by white-gray dotted lines; (b) Flight tracks over the Site 2 in summer 2012; (c) Flight tracks over the Site 2 in winter 2012–2013.



The sampling strategy has been elaborated from previous studies above the “Landes” forests [6,7]. The horizontal resolution is driven by the laser PRF, the ULA’s ground speed and the laser divergence; its mean value has been computed using a set of footprints randomly spread in the sampling site and found to be ~2 m.

3. Theory

Lidar backscatter profiles include a signature from vertical forest structures, which is dominant compared to the atmospheric contribution. Hence, the TTH can be extracted from the lidar profile [6]. However, the entire lidar profile within the canopy, bounded by the TTH, is also key information with which to derive the AGC from the quadratic mean canopy height (QMCH) as defined by Lefsky *et al.* [31]. Hereafter, the inversion methodology is entirely described before estimating the uncertainty sources and magnitudes. We can distinguish two main steps. The first step, to retrieve the

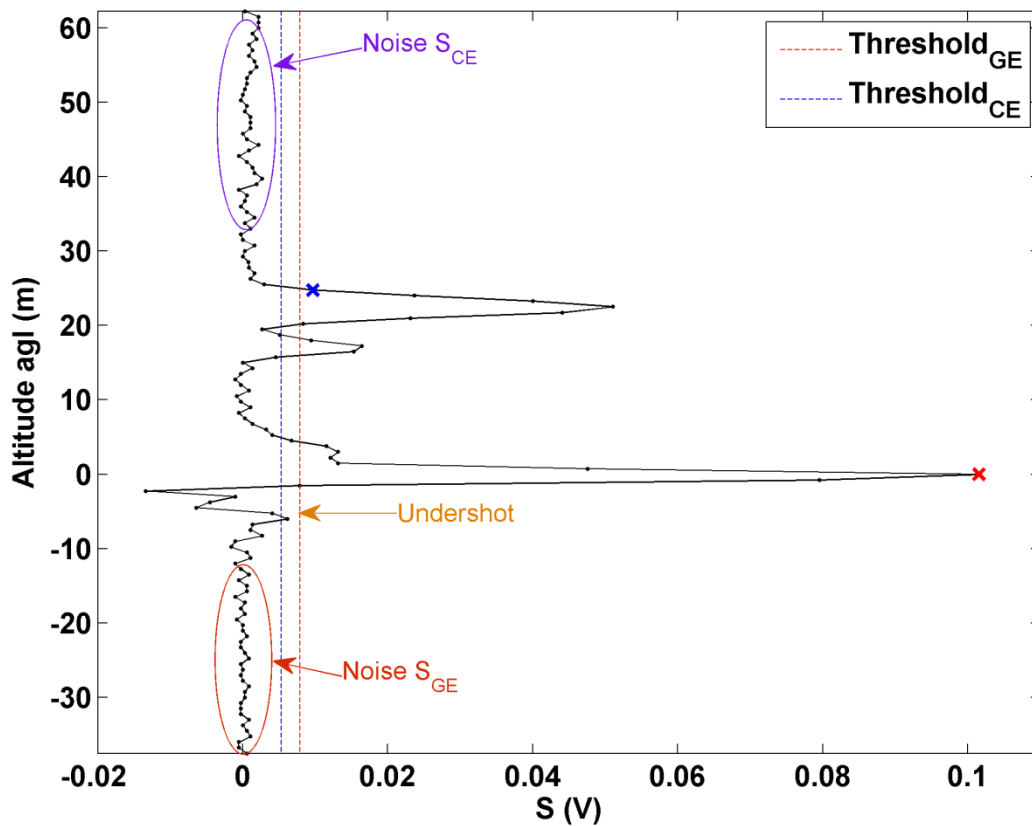
TTH and QMCH, is only dependent on the lidar measurements, whilst the second, to retrieve the AGC, needs exogenous material extracted from the scientific forestry literatures.

3.1. Tree Top Height (TTH) Retrieval from Lidar Measurements

The TTH is calculated as the distance between the first return at the upper surface of the vegetation and the last return from the ground surface. In order to retrieve forest vertical structures, it is necessary to detect the intensity peaks of both the canopy and ground echoes in the full-waveform lidar signals. A similar method has been used in atmospheric studies for the identification of clouds by Chazette *et al.* [32]. This algorithm has been significantly improved by using a sensitivity approach to retrieve the different values of thresholds.

The method is composed of two threshold steps. The first is the detection of the ground echo compared to the noise level, which can be inferred from the signal remaining after the ground echo when only the instrumentation noise exists (Figure 4). The noise is thus calculated beneath the undershot linked to the quick transition associated with the ground echo. The second step is the detection of the canopy echo, considering the atmospheric signal just above the trees (Figure 4).

Figure 4. Typical example of a lidar profile measured over a sampling site. The two thresholds used to detect the ground echo (GE) and the canopy echo (CE) are represented in red and blue, respectively.



The ground echo (GE) is defined from the last echo peak of a lidar profile (the furthest from the laser emission), while the signal of the canopy echo (CE) is identified as all return lidar signals above the GE. Both the GE and the CE are defined by inequalities on the lidar signal S by:

$$\begin{cases} S > \overline{S_{GE}^N} + C_{GE} \cdot \sigma_{GE}^N \\ S > \overline{S_{CE}^N} + C_{CE} \cdot \sigma_{CE}^N \end{cases} \quad (1)$$

where $\overline{S_x^N}$ and σ_x^N are the mean value and the standard deviation of S^N (the noise signal), respectively, under the ground level for the GE ($x = GE$) and above the canopy top for the CE ($x = CE$). C_{GE} and C_{CE} are coefficients that are optimized by seeking the minimum relative residue on the mean tree top height (MTTH) retrieval following an iterative approach. Note that the lidar GE waveform should be calibrated by using the return laser pulse in the nadir/zenith direction over a flat surface such as the tarmac of the aerodrome from where the ULA took off.

After retrieval of both the GE and CE, the lidar-derived TTH was obtained for each lidar profile (*i.e.*, the distance between the blue and the red crosses in Figure 4). However, owing to the ULA attitude, the laser beam is not always emitted with a perfect nadir direction and so a distortion may be observed on the retrieved TTH. Moreover, the location of the laser footprint can also be affected by the ULA attitude. So the TTH and the location of the footprint have to be corrected as described in Appendix A.

3.2. Quadratic Mean Canopy Height (QMCH) Retrieval from Lidar Measurements

With the ULICE system, individual trees cannot be distinguished because of the footprints overlaps—a higher accuracy of geolocation would be required to do so. However, our research focuses on the carbon estimation for statistically representative plot sizes of forest properties. Lidar profiles after correction of the ULA attitude in each given plot are then averaged, and the QMCH was introduced to determine a better correlation between lidar measurements and field-derived carbon, as described in Lefsky *et al.* [31].

The transmittance height profile (THP) is estimated between the GE and the CE (*TTH*), from the average lidar signal in the plot, by taking the ratio of the energy from canopy returns (E_h) to the total energy (E_0) (Equation 2), which also amounts to the fraction of the sky covered by canopy. Hence the THP can be explained for a flight altitude $agl\ z_f$ by:

$$THP(h) = \frac{E_h}{E_0} = \frac{\int_0^{TTH} (z_f - u)^2 \cdot S(u) \cdot du}{\int_0^{TTH} (z_f - u)^2 \cdot S(u) \cdot du} \quad (2)$$

where:

$$S(h) = \frac{C}{(Z_f - h)^2} \cdot \beta(h) \cdot \exp \left[-2 \int_h^{Z_f} \alpha(z) \cdot dz \right] \quad (3)$$

with C the lidar instrumental constant, α the extinction coefficient, and β the backscattering coefficient [33].

The THP can be considered as the cumulative probability density function that a photon does not reach level h after crossing the canopy between *TTH* and h . Note that multiple scattering within the canopy may affect this consideration. Nevertheless, we do not consider it here as we operate on the UV

wavelength and are less sensitive to the multiple scattering effects. Therefore, the probability density function (PDF) that a photon coming from the level h is scattered at the level $h-dh$ can be expressed as:

$$(1 - THP)_{h-dh} = (1 - THP)_h \cdot (1 - CHP_h) \cdot dh \quad (4)$$

where CHP is the canopy height profiles as defined in Lefsky *et al.* [31]. This is also the PDF defining the fraction of sky covered by canopy between the levels h and $h-dh$. From Equation (4), we find that:

$$CHP_h = \frac{d \ln(1 - THP)_h}{dh} \quad (5)$$

The ULICE system cannot distinguish various scattering sources, so CHP characterizes the surface area of all canopy material (foliar and woody). When integrating Equation (5), the cumulative CHP ($CCHP$) between h and TTH , as described by the MacArthur Horn equation [34] and used for airborne and/or spaceborne lidar measurements by several authors (e.g., [31,34]), can be derived as:

$$CCHP_h = -\ln(1 - THP_h) \quad (6)$$

By using CHP , we can also express both the mean canopy height (MCH) and the QMCH as:

$$\begin{cases} MCH = \int_{TTH}^0 h \cdot CHP_h \cdot dh \\ QMCH = \sqrt{\int_{TTH}^0 h^2 \cdot CHP_h \cdot dh} \end{cases} \quad (7)$$

Lefsky *et al.* [31] have pointed out that, amongst several studied variables, the QMCH is the most highly correlated with the AGB or AGC. Nevertheless, the assessment of the QMCH requires the prior assessment of the TTH. Note that the lidar-derived QMCH and MCH are in good agreement (not shown) and that it would be equivalent to use one or the other for the AGB or AGC retrieval. To preserve the coherence with previous authors, we hereafter used only the QMCH to assess the AGC.

3.3. Aboveground Carbon (AGC) Retrieval from Field Measurements

Allometric equations that relate the AGC of forests to the stem dimensions are almost universally used [4,5,13,17,31,35]. The assessment of the AGC for each documented tree (AGC_i) requires the knowledge of its total volume (V_{tot}), which is defined as the volume of all aerial living woody parts, including small branches and twigs. The tree top height (TTH) and the circumference at breast heights (CBH) are required to calculate the total volume.

Generally, the CBHs are more likely to be available; the TTHs are then assessed from a non-linear monotonically increasing relationship between TTH and CBH. This allometric law (also called “heights curve”) is widely applied to calculate the average and the dominant TTH. Among the commonly used models, the hyperbolic model of De Dhôte and De Hercé [36] seems more robust and better adapted to the geometry of the heights-circumferences dispersion. The initial model is used for beeches and oaks. It gives TTH (in m) against CBH (in cm) as follows:

$$TTH(CBH) = \frac{\mu_1 + \mu_2 CBH - \sqrt{(\mu_1 + \mu_2 CBH)^2 - 4\mu_1\mu_2\mu_3 CBH}}{2\mu_3} + 1.3 \quad (8)$$

where μ_1 , μ_2 and μ_3 are coefficients to be adjusted.

Hereafter the allometric relationships given in Vallet *et al.* [37] have been used to derive V_{tot} and then AGC_t . V_{tot} (in m^3) of each tree can be calculated by using a total volume equation, which is expressed by CBH (in cm) and TTH (in m) as:

$$V_{tot}(CBH, TTH) = \xi(CBH, TTH) \cdot \frac{1}{4000\pi} \cdot CBH^2 \cdot TTH \quad (9)$$

where $\xi(CBH, TTH)$ is the ratio between the tree's volume and that of a cylinder of similar height and circumference. Its mathematical model reads as follows:

$$\xi(CBH, TTH) = \alpha + \beta \cdot CBH + \gamma \cdot \frac{\sqrt{CBH}}{TTH} + \varepsilon \quad (10)$$

where α , β and γ are the coefficients adjusted for tree species, and ε is the model's residual. AGC_t (in $tC \text{ tree}^{-1}$) for each individual tree has then been computed as:

$$AGC_t = V_{tot}(CBH, TTH) \cdot DEN \cdot CAR \quad (11)$$

where DEN is the basic density for the species, and CAR is the proportion of carbon in the dry matter.

Hence, AGC_t derived from field measurements has been calculated to assess the plot-level AGC in the documented area, which has been divided into plots of a predefined size. The GPS used during the field measurements brings an uncertainty on the n trees' locations. For this reason, the plot-level AGC (AGC_{plot} given in $tC \text{ ha}^{-1}$) has been derived from the contributions of each AGC_t weighted by the PDF W that trees fall in the considered plot as:

$$AGC_{plot} = \frac{100^2}{S_{plot}} \cdot \sum_{i=1}^n W(\lambda_i, \varphi_i) \cdot AGC_t(\lambda_i, \varphi_i) \quad (12)$$

where W is a function of latitude (λ) and longitude (φ), and S_{plot} (in m^2) is the predefined plot surface.

3.4. AGC Estimation via QMCH

Following the work of Lefsky *et al.* [31], a linear regression can be established between the plot-level QMCH and field-derived AGC_{plot} as

$$AGC_{plot} = a + b \cdot QMCH^2 \quad (13)$$

where a and b are the coefficients to be adjusted from AGC_{plot} and $QMCH$ values obtained in the documented area. This relationship (Equation 13) allows generalizing the lidar-estimated plot-level AGC ($tC \text{ ha}^{-1}$) to the entire sampling area.

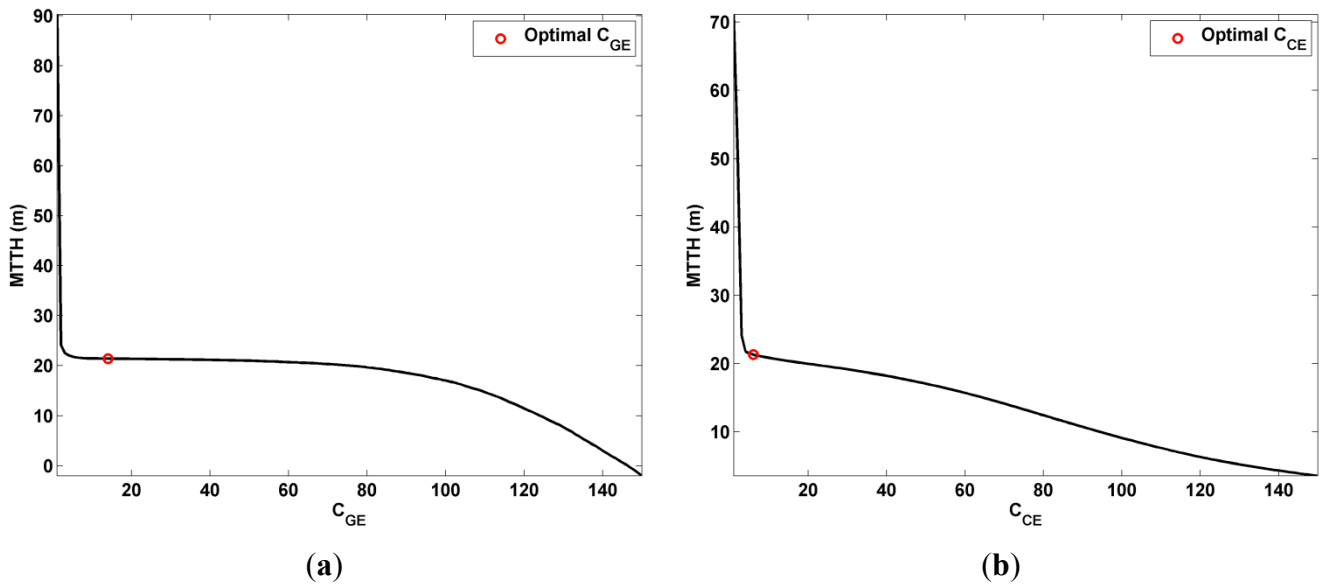
4. Experimental Results and Uncertainties for Airborne Full-Waveform UV Lidar Measurements

4.1. Forest Vertical Structures and Related Uncertainties

4.1.1. Thresholds Detection and Forest Vertical Structures

The signal to noise ratio (SNR) of the ULICE system is large enough (with a mean value ~ 16 within the canopy) to apply a direct threshold approach (Section 3.1) by using Equation (1). After an iterative approach, the optimal values of coefficients C_{GE} and C_{CE} have been derived. In fact, the numbers that follow the decimal point do not significantly change the final result, so these coefficients have been rounded to be the nearest integers as 13 and 7, respectively. Figure 5 gives the MTTH against the different values of the previous coefficients considered during the iterative approach. The optimal coefficients are located on the flattening part of monotonous decreasing functions.

Figure 5. Mean tree top height (MTTH) against the threshold coefficients C_{GE} (a) and C_{CE} (b) for the ground echo (GE) and the canopy echo (CE), respectively.



Using the GE detection alone, a three-dimensional vegetation structure of the forest can be directly derived from the raw lidar profiles corrected from the background sky radiance as shown in Figure 6 for Site 1. Six horizontal planes have been extracted along the vertical to show the apparent treetops of overstory and understory trees, the tree trunks and the ground echoes. The contribution to the lidar return signal between ~ 5 and 15 m is mainly attributed to trunks and low branches. Two lidar profiles shown on the right of Figure 6 represent the typical signals of overstory and understory trees, respectively.

Several lidar profiles may include information on the same trees. Therefore, Site 1 has been divided into equal pixels ($7 \text{ m} \times 7 \text{ m}$) according to the known average distance between trees ($\sim 10\text{--}15 \text{ m}$) comparatively to the footprint size of $\sim 2 \text{ m}$. Each pixel typically represents one tree, whose canopy height (CH) is retrieved as the highest TTH (HTTH) of all lidar profiles in this pixel. The CH map is shown in Figure 7 where the tallest trees have been identified and located in the sampling area.

Figure 6. Vegetation distributions at Site 1 retrieved from ULICE measurements. The color code displays the lidar signal amplitude, which indicates the intensities of the inner forest vertical structures. Six planes are defined and highlight the apparent tree tops of overstory and understory trees, the tree trunks and the ground echoes. Two lidar profile examples are shown on the right with opposite x-axes: the blue one is for an understory tree and the red one for an overstory tree.

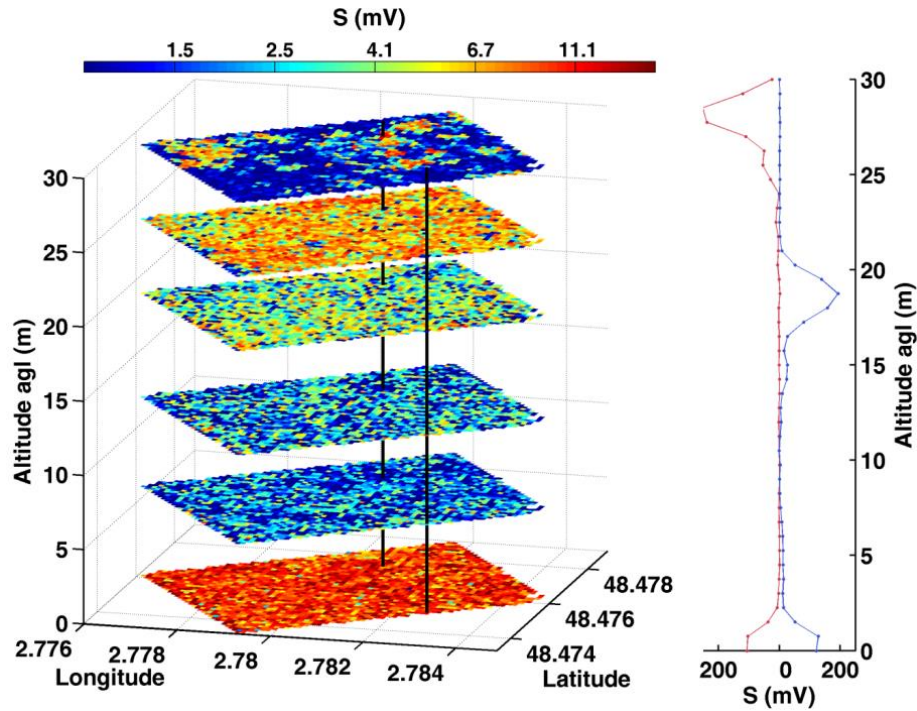
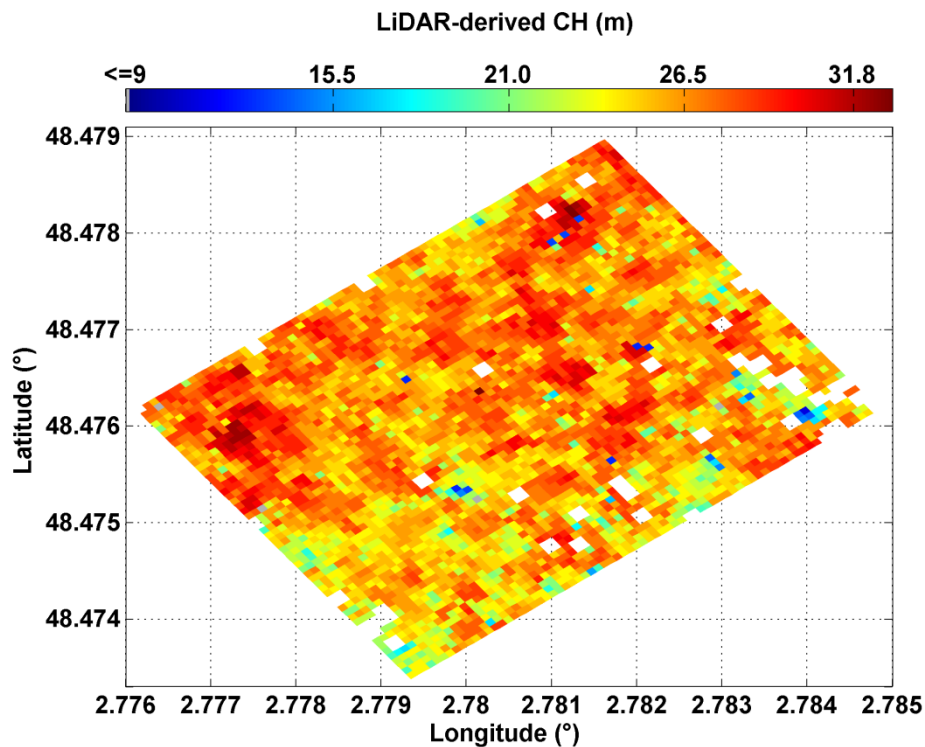


Figure 7. Lidar-derived canopy height (CH) with pixel size of 7 m \times 7 m of Site 1. The white pixels correspond to the area where lidar profiles are missing.



4.1.2. Uncertainties and Validation

The lidar signal has been simulated from real measurements, via a Monte Carlo approach [32], to assess the standard deviation (σ_{TTH_lidar}) and the bias (B_{TTH_lidar}) linked to the TTH retrieved from the lidar profiles. The error calculation has been performed using 64 representative mean lidar profiles that have been simulated. For each profile, 200 random realizations have been considered, ensuring a normal distribution around the mean value. The standard deviation of lidar profile (σ_L) at the altitude $agl(z)$ has been calculated from the lidar signal S , the background radiance S_{BR} and the SNR given by:

$$SNR(z) = \frac{S(z) - S_{BR}}{\sigma_L(z)} \quad (14)$$

whereas, in fact, $\sigma_L(z) = A \times (S(z))^{1/2}$ is mainly due to shot noise with a constant coefficient A assessed on the real lidar profile. The SNR values have been retrieved as ~ 30 for the peaks of both the CE and the GE. The detection procedure was applied to all random realizations to calculate σ_{TTH_lidar} and B_{TTH_lidar} , which were found to be equal to 0.80 m and 0.87 m, respectively. The total uncertainty on the lidar-derived TTH (ε_{TTH_lidar}) is then ~ 1.2 m, which is reported with other uncertainties in Table 4.

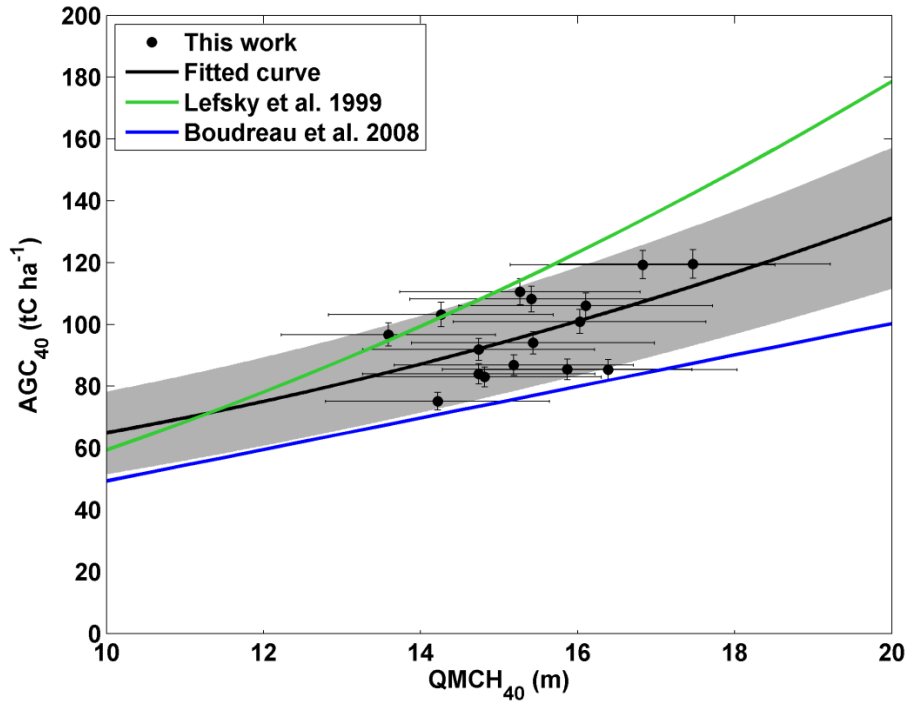
Table 4. Synthesis of uncertainties (ε) and their assessment sources ^a.

1. Uncertain ty	2. Value	3. Uncertainty Elements	4. Estimate Sources
ε_{TTH_lidar}	1.2 m	$\sigma_{TTH_lidar} = 0.8$ m, $B_{TTH_lidar} = 0.87$ m	Lidar simulation (Monte Carlo)
$\varepsilon_{TTH_estimate}$	2.6 m	$\sigma_{TTH_estimate}(\sigma_{TTH_field}, \sigma_{CBH_field}) = 0.3$ m, with $\sigma_{TTH_field} = 1$ m and $\sigma_{CBH_field} = 0.02$ m $\sigma_{TTH_estimate}(Regression) = 2.6$ m	Field measurements Regression fit
ε_{AGCt_field}	9%	$\varepsilon_{AGCt_field}(\sigma_{TTH_estimate}, \sigma_{CBH_field}) = 8\%$ $\varepsilon_{AGCt_field}(\sigma_a, \sigma_b, \sigma_\gamma) = 4\%$	Equation (11) Allometric relationships Equation (11)
$\varepsilon_{AGC40_field}$	4%	$\varepsilon_{AGC40_field}(\varepsilon_{AGCt_field})$	Simulation (Monte Carlo)
ε_{QMCH}	10%	$\sigma_{QMCH}(SNR, Detection) = 10\%$ $\sigma_{QMCH}(\varepsilon_{GPS}, \varepsilon_{AHRS}) = 0.12$ m, with $\varepsilon_{GPS} = 5$ m and $\varepsilon_{AHRS} = 3.6$ m	Lidar measurements Geolocation measurements
$\varepsilon_{AGC40_lidar}$	16 tC ha ⁻¹	$\varepsilon_{AGC40_lidar}(Regression) = 12$ tC ha ⁻¹ $\varepsilon_{AGC40_lidar}(\varepsilon_{QMCH}) = 11\%$	Regression fit Equation (13), Figure 8 Equation (13)

^a TTH, tree top height; AGC, aboveground carbon. The detailed descriptions of uncertainties can be found in Section 4.

In our experiment, the lidar sampling resolution along the lidar line of sight was settled to be 0.75 m. Through simulation calculations, we found out that there was no significant difference when considering an ε_{TTH_lidar} computed for sampling resolutions between 0.3 and 3 m.

Figure 8. Field-derived plot-level AGC estimated for 16 plots of 40 m \times 40 m, plotted against the lidar-derived plot-level QMCH for these plots. The linear regression passing through the points is drawn by a bold line. The uncertainties on the lidar-derived $QMCH_{40}$ (ϵ_{QMCH}) and field-derived AGC_{40} (ϵ_{AGC40_field}) are given as error bars. The uncertainty of the lidar-derived AGC_{40} (ϵ_{AGC40_lidar}) is drawn as the gray area. The relationships published by Boudreau *et al.* [38] and Lefsky *et al.* [31] are also given.



Lidar measurements of TTHs have been proven in previous works to be in very good agreement with field measurements, using statistical and one-to-one comparisons as shown by Cuesta *et al.* [6]. In order to validate the lidar-derived tree height attributes, a comparison was conducted in our study over the well-documented central area of Site 1 (Figure 3a). Accordingly, the central area was divided into 5 \times 5 plots of 32 m \times 32 m in order to be sure that the same highest trees were compared across lidar and field measurements. Such horizontal sampling minimizes the effect of tree growth that mainly occurs for young trees when ground-based and airborne measurements are not coincident in time. For each plot the HTTHs of both lidar and field measurements were identified and assessed on average as 28.5 ± 1.1 m and 28.5 ± 0.6 m, respectively. They are very consistent within an uncertainty of ~ 1 m, which is similar to the previous results of Cuesta *et al.* [6].

4.2. AGC Assessment and Related Uncertainties

AGC assessment was conducted over Site 1 (Figure 2), where oaks are the main contributors to the AGC although hornbeams occupy the understory and are the most abundant. This site is divided into 10 \times 13 plots of 40 m \times 40 m. This surface is equal to the general forest plot size and can be considered as close to the ideal footprints of a spaceborne lidar. The tree characteristics (e.g., TTH, CBH, location) are sufficiently documented in a central area of 2.6 ha (Figure 3a), which is composed of 4 \times 4 plots, so as to estimate the AGC from field measurements and calibrate the lidar measurements.

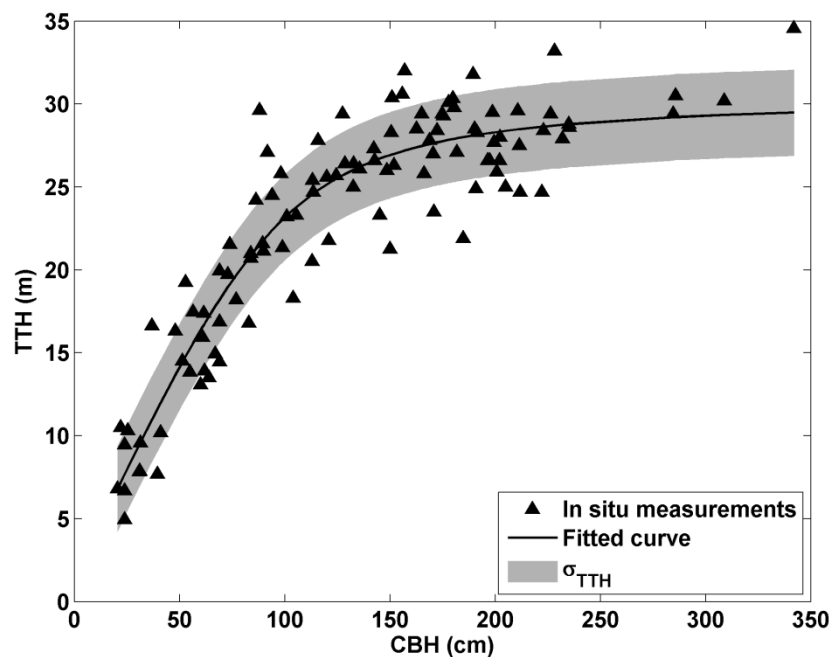
4.2.1. Field-Derived AGC and Related Uncertainties

In the sampling central area of Site 1 (Figure 3a), the CBHs and locations of all trees (1372 trees) in these 16 plots were measured. Amongst these trees, the TTHs were measured on a sub-sample of 134 trees (105 oaks and 29 hornbeams). Thus, the *CBH-TTH* allometric relationship, as in Equation (8), has been fitted to these field measurements of 105 oaks as shown in Figure 9, with an explained variance of $r^2 \sim 0.9$. The derived values of coefficients μ_1 , μ_2 and μ_3 are 30.51 m, 0.27 m cm⁻¹ and 0.92, respectively.

The standard deviations of *TTH* and *CBH* from field measurements were calculated from a minimum of six consecutive measurements for each documented oak, and found to be $\sigma_{TTH_field} \sim 1$ m and $\sigma_{CBH_field} \sim 0.02$ m on average. This leads to a mean value of $\sigma_{TTH_estimate}(\sigma_{TTH_field}, \sigma_{CBH_field}) \sim 0.3$ m with a negligible bias in the model (Equation 8). The uncertainty of the regression fit on estimated *TTH* ($\sigma_{TTH_estimate}(Regression)$) is ~ 2.6 m. Thus, the uncertainty on estimated *TTH* ($\varepsilon_{TTH_estimate}$) is ~ 2.6 m, as highlighted by the gray area in Figure 9 and listed in Table 4.

The AGC for each documented tree (AGC_t) are then assessed by using Equations (9-11), where the coefficients are adjusted for sessile oaks as follows: $\alpha = 0.471 \pm 0.014$, $\beta = -3.45 \times 10^{-4} \pm 0.13 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ and $\gamma = 0.377 \pm 0.031 \text{ m}^{0.5}$ with a mean residual $\varepsilon \sim 0.002$ [37]; $DEN = 0.55 \text{ tg m}^{-3}$ and $CAR = 0.5 \text{ gC g}^{-1}$ [29]. $\sigma_{TTH_estimate} \sim 2.6$ m and $\sigma_{CBH_field} \sim 20$ cm bring an uncertainty on AGC_t ($\varepsilon_{AGC_t_field}(\sigma_{TTH_estimate}, \sigma_{CBH_field})$, Table 4) of $\sim 8\%$; whilst the variances (σ_α , σ_β , σ_γ) of the coefficients (α , β , γ) bring $\sim 4\%$ uncertainty on AGC_t ($\varepsilon_{AGC_t_field}(\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \sigma_\gamma)$, Table 4). These values were computed using a Monte Carlo approach as previously described.

Figure 9. Relationship between the circumference at breast height (CBH) and the tree top height (TTH) for the 105 oaks in the central area of Site 1. The individual measurements are given by triangles; the standard deviation of the fit linked to the uncertainties on field measurements is given by the gray area.



The field-derived AGC_{plot} has been used rather than AGC_t to calibrate the lidar measurements with the field measurements. As described in Section 3.3, AGC_{plot} can be seen as a statistical summation of AGC_t in the chosen plot surface S_{plot} . The error on field-derived AGC_{plot} for a S_{plot} of 40^2 m^2 (expressed as $\varepsilon_{AGC40_field}$) computed via a Monte Carlo approach is then $\sim 4\%$ (see Table 4), which is shown as error bars in Figure 8. The estimated AGC derived from field measurements in the central area of Site 1 is then $97 \pm 4 \text{ tC ha}^{-1}$.

4.2.2. Lidar-Estimated AGC and Related Uncertainties

The assessment of the lidar-derived AGC passes through the use of Equation (13) and then needs the knowledge of both coefficients a and b . Coefficients a and b are themselves assessed from the lidar-derived $QMCH$ and the field-derived AGC_{plot} of the 16 documented plots of $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ (Figure 8). Hence, we found $a = 42.36$ and $b = 0.24$. Such fitting poorly constrains the smaller trees that have not been sampled in Site 1, which is mainly populated with mature oaks (the most relevant for the carbon stock). Nevertheless, the relationships derived from Boudreau *et al.* [38] and Lefsky *et al.* [31] surround our curve. The relationship derived from the work of Boudreau *et al.* [38] is also plotted in Figure 8. It corresponds to a Canadian mixed forest with deciduous and conifer trees with a mean TTH between 4 and 17 m, which are smaller than the oaks of Site 1. The slope of that curve is lower than the one we retrieved. Lefsky *et al.* [31] also proposed a relationship for a North America deciduous forest as shown in the same figure. Our results are thus in the same range as these previous studies and we will therefore employ the relationship that we have established to perform the uncertainty study.

The uncertainties on the lidar-estimated AGC are generated from two main sources that we will analyze in this section: the retrieval of the $QMCH$ from the full-waveform UV lidar, and the calibration comparatively to the field measurements.

4.2.2.1. Uncertainties on the Lidar-Derived $QMCH$

In this section, the well-known delta method, using the second-order Taylor expansions to approximate the variance of a function (e.g., [39]), has been applied for the uncertainty calculations. The THP is defined as Equation (2) where each sampling point can be considered to be independent. Therefore, the variance on THP_h can be expressed at the second order as follows:

$$\text{var}(THP_h) = \frac{1}{E_0^2} [\text{var}E_h + THP_h^2 \cdot \text{var}E_0 - 2 \cdot THP_h \cdot \text{cov}(E_h, E_0)] \quad (15)$$

where:

$$\begin{cases} \text{var}E_h = \int_h^{TTH} (z_f - v)^4 \cdot \text{var}[S(v)] \cdot dv \\ \text{var}E_0 = \int_0^{TTH} (z_f - u)^4 \cdot \text{var}[S(u)] \cdot du \\ \text{cov}(E_h, E_0) = \Delta v \cdot \text{var}E_h \end{cases} \quad (16)$$

The QMCH can thus be obtained from the THP as given in Equation (7). In order to simplify the calculation of the variance, integration by parts has been applied for the expression of $QMCH^2$ leading to:

$$QMCH^2 = \int_{TTH}^0 \frac{d(\ln(1 - THP_h) \cdot h^2)}{dh} dh - \int_{TTH}^0 \ln(1 - THP_h) \cdot 2h \cdot dh \quad (17)$$

Across these two parts of the partial integration, the first part is zero by the integration between heights of 0 and TTH . Hence, the approximate variance of $QMCH^2$ at the second order can be retrieved by:

$$\text{var}(QMCH^2) = \int_0^{TTH} \left(\frac{2h}{1 - THP_h} \right)^2 \cdot \text{var}(THP_h) \cdot dh \quad (18)$$

that can be also explained as:

$$\text{var}(QMCH) = \frac{1}{4QMCH^2} \int_0^{TTH} \left(\frac{2h}{1 - THP_h} \right)^2 \cdot \text{var}(THP_h) dh \quad (19)$$

In fact, the uncertainty on $QMCH$ (expressed as σ_{QMCH}) for lidar measurements depends on: (1) the QMCH values; (2) the variances of the lidar signal $S(h)$, which themselves depend on the values of lidar SNR; and (3) the detection of the ground echo and the canopy echo. Through a Monte Carlo approach, $\sigma_{QMCH}(SNR)$ is found to be $\sim 3\%$ for a mean SNR ~ 10 and a QMCH value between 10 and 20 m. The contributions of the TTH error and detection errors of the GE and the CE have been also assessed. They bring an uncertainty $\sigma_{QMCH}(Detection) \sim 9\%$. Thus, σ_{QMCH} is found to be of the order of 10%.

The uncertainty of laser footprints geolocation also brings an uncertainty on the QMCH, but it appears to be negligible compared with the previous uncertainty sources. Since the accuracy of the GPS (ϵ_{GPS}) and the AHRS (ϵ_{AHRS}) are 5 m and 3.6 m, respectively, the uncertainty of geolocation is 6.2 m. We assume that the uncertainties along the latitude (λ) and the longitude (ϕ) are similar, which means $\sigma_\lambda = \sigma_\phi = 4.4$ m. As previously, when using a Monte Carlo approach the related standard deviation of QMCH is found to be $\sigma_{QMCH} \sim 0.12$ m. It is small because the QMCH here is calculated from averaged lidar profiles, which reduces the statistical uncertainty and so leads the geolocation uncertainty to be less important.

As a result, the total uncertainty on the lidar-derived plot-level QMCH (ϵ_{QMCH}) is $\sim 10\%$, whose uncertainty sources are listed in Table 4. It means there is a QMCH uncertainty of ~ 1.5 m for the mean QMCH value of ~ 15 m that is encountered during our experiments.

4.2.2.2. Uncertainties on the Lidar-Derived AGC_{40}

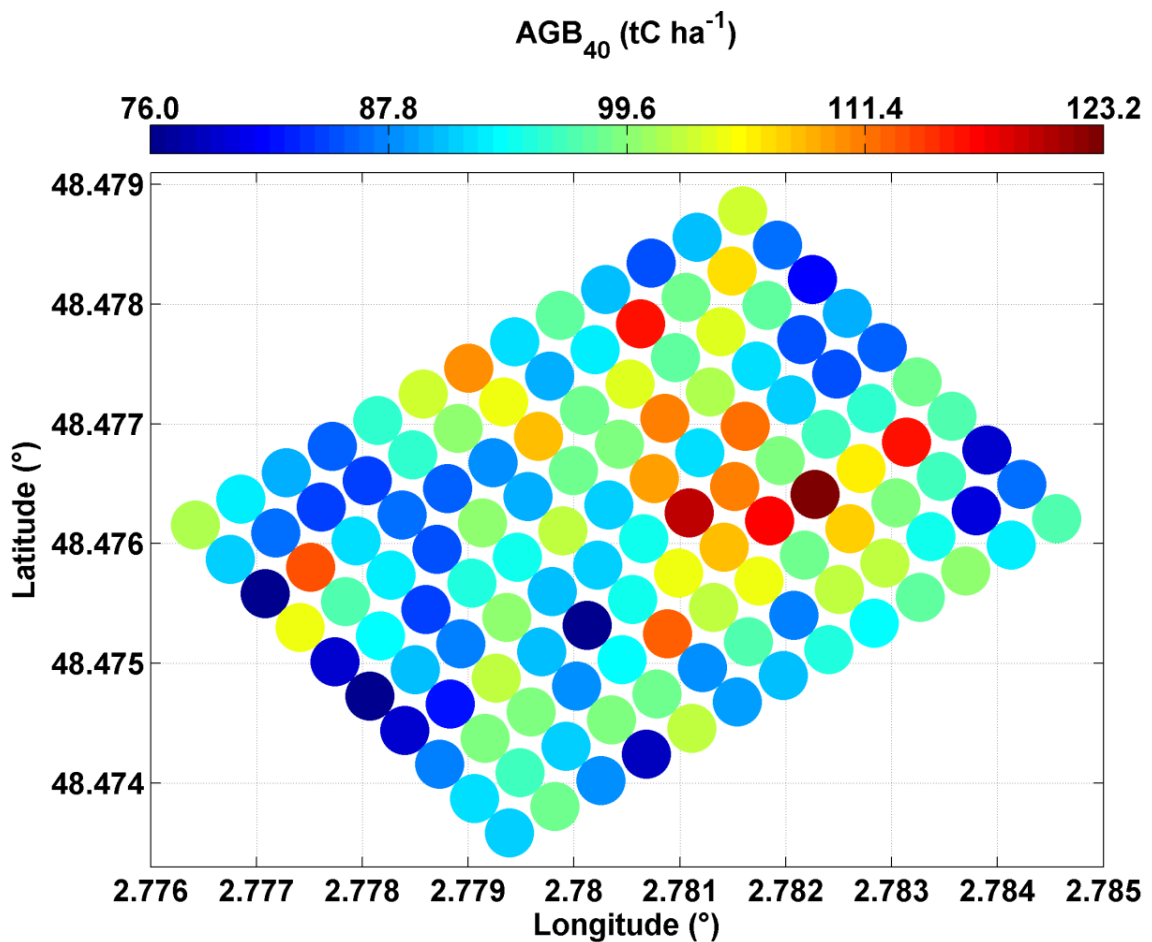
The plot-level AGC for a surface of $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ is expressed as AGC_{40} . The lidar-derived AGC_{40} is calculated from the lidar-derived plot-level $QMCH$ following Equation (13). The uncertainty due to this relationship ($\epsilon_{AGC40_lidar}(Regression)$) is found to be close to 12 tC ha^{-1} . ϵ_{QMCH} also contributes to an error on AGC_{40} ($\epsilon_{AGC40_lidar}(\epsilon_{QMCH})$) of $\sim 11\%$. Moreover, at this scale, the errors caused by the lidar footprint geolocation became negligible compared with the other uncertainty sources. The total uncertainty on the lidar-derived AGC_{40} (ϵ_{AGC40_lidar}) is found to be $\sim 16 \text{ tC ha}^{-1}$ (as shown by the gray area in Figure 8).

A synthesis of uncertainties and their uncertainty sources is given in Table 4. Note that Zolkos *et al.* [14] discussed the root mean square error (RSE) for different lidars (spaceborne and airborne lidars) and derived from an error model a RSE of between 15 and 40 tC ha⁻¹ for our AGC value.

4.2.2.3. Discussion of the AGC_{40} and Its Uncertainty

After generalizing the lidar-estimated plot-level AGC (AGC_{40} in tC ha⁻¹) to the entire sampling area, we found out that the mean AGC_{40} for 130 plots is 95.5 tC ha⁻¹, with a range from 76 to 123 tC ha⁻¹ and a spatial variability (standard deviation) of ~16 tC ha⁻¹ (shown in Figure 10).

Figure 10. Lidar-derived plot-level aboveground carbon for 40 m × 40 m forest plots (AGC_{40}) at Site 1.



As shown in Table 5, this result is in a good agreement with the relevant literature studies, among which three approaches have been used: either a modeling method, lidar measurements or field measurements. It demonstrates that our study is based on realistic levels of carbon for deciduous forest. Le Maire *et al.* [29] found similar results in a Fontainebleau forest region that borders our sampling site. The AGC estimated through their model was about 110 tC ha⁻¹ on average, but may reach more than 200 tC ha⁻¹ in mature oak forests. A similar order of magnitude of the AGC in mature sessile oak forests is also shown by Vallet *et al.* [40]. Note that the uncertainties are not clearly explained by these authors.

Table 5. AGC synthesis from different references ^a.

Location	Forest type	\overline{AGC} (tC ha ⁻¹)	σ_{AGC} (tC ha ⁻¹)	Data type	References
Fontainebleau forest, France	Deciduous trees (oak, hornbeam)	96	16	LMe	This work
Fontainebleau forest, France	Deciduous trees (oak)	110	-	Mo	Le Maire <i>et al.</i> [29]
France	Total (oak, fagus, pinus)	88.5	-	Mo	
Central France	Sessil oak	106	-	Mo	Vallet <i>et al.</i> [40]
Lopé National Park, centre Gabon	Tropical rainforest	172.6	48.8	LMe	Mitchard <i>et al.</i> [41]
North America	Deciduous forest (oaks, hickories, beechs, tulip-populars)	118	37.6	LMe	Lefsky <i>et al.</i> [31]
Western cascades of Oregon, Pacific Northwest	Young conifer forests	106.5	33.5	FMe	Means <i>et al.</i> [17]
	Mature conifer forests	246	86		
North Island, New Zealand	Radiata pine dominated forests	117	23	LMe	Stephens <i>et al.</i> [42]
Southeastern Norway, Norway	Boreal forest	50.6	0.8	LMe	Næsset <i>et al.</i> [43]
	Spruce, Scots pine	58	1.85	FMe	

^a AGC, aboveground carbon; \overline{AGC} , the mean AGC; σ_{AGC} , the standard deviation of AGC; Mo, modeling data; LMe, lidar measurements data; FMe, field measurements data.

Zolkos *et al.* [14] pointed out that lidar is significantly better at estimating carbon than passive optical or radar sensors used alone. Their synthesis of data from about fifty studies, using airborne discrete/full-waveform lidar, indicated a mean residual standard error greater than 10 tC ha⁻¹ for all models. This value ranges from 18% to 34% when it is expressed relative to the average field-measured carbon.

The uncertainties calculated from the field measurements only took into account the coefficients of the allometric law (as α , β and γ). The shape of the law is considered to be exact as defined from field measurements previously published. Nevertheless, it can be an additional important exogenous error source that we cannot quantify in this work.

4.3. Leaf Effect

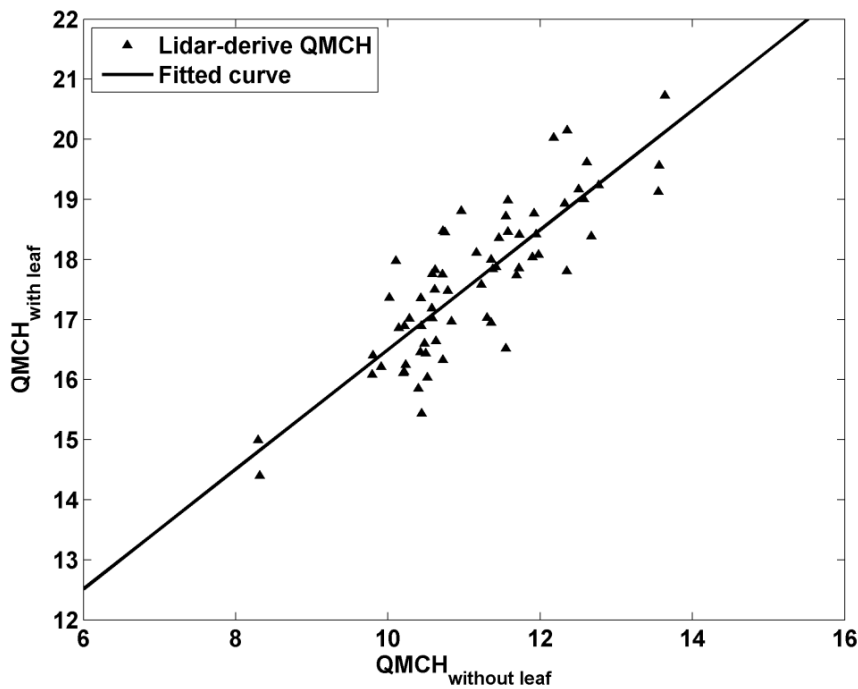
The effect of leaves on the AGC has been studied over Site 2 (Figure 2). Both in the summer 2012 and in the winter 2013 flight tracks have been realized with footprint size of ~2 m (Figure 3b,c). The choice of flight plan was driven by the wind direction. The useful lidar profile numbers are 35,363 and 58,244, in summer and winter, respectively. After signal processing, the GE and the TTH for each lidar profile have been retrieved. Note that the detections of the GE are not always available for individual lidar profile received in summer, owing to the signal attenuation by canopy leaf strata and the effects of ground cover vegetation.

Following this, the Site 2 was divided into 65 plots of 40 m × 40 m. In each of them the plot-level QMCHs of both summer and winter measurements were retrieved and are represented in Figure 11.

The relationship appears to be linear. By comparing the QMCHs derived from summer and winter lidar measurements, it seems that the QMCHs in winter (for trees without leaves) have significant smaller values, because the weight of the CE in the total lidar profile is smaller with a large GE. The different structures within the canopy between winter and summer time imply a significant difference of the QMCH with a mean value ~ 6 m, which leads to an AGC overestimation of $\sim 50\%$ in summer when using winter calibration. As a result, it is necessary to calibrate the relationship (Equation 13) between the lidar-derived QMCH and the field-derived AGC for experiments under different seasons.

However, the AGC estimates do not significantly change between summer and winter. The difference of the lidar signal shapes within the canopy is due to the presence of leaves. The overestimation of AGC could be considered as a non-systematic bias and can be corrected. This possibility is subtended by the results shown in Figure 11. Note that the relative uncertainty on QMCH has been assessed to be similar during winter and summer.

Figure 11. Comparison among the plot-level QMCHs (for $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ forest plots in Site 2), which are derived from experiments at Site 2 in summer 2012 (with leaf) and winter 2013 (without leaf). The relationship is found to be $QMCH_{with \text{ leaf}} = 0.996 \times QMCH_{without \text{ leaf}} + 6.5$ ($r^2 \sim 0.7$).



5. Conclusions

The airborne full-waveform UV (355 nm) lidar demonstrator ULICE has been embedded on an ULA to assess the forest vertical structures, the AGC and the contribution of each related uncertainty source. The accuracy of the vertical location of the canopy structures has been expected to be enhanced by the use of the wavelength of 355 nm because it could minimize the multiple-scattering effect in the canopy. Hence, ULICE should be of interest as a measurement instrument during the preparation of future space missions dedicated to forest studies at the global scale. The experiments have been

conducted over well-documented mid-latitude sites of the Fontainebleau forest in the south-east of Paris. This forest is representative of managed mature deciduous forests of oaks, common in France and in Europe; it provides access to realistic vertical samplings with which to test our canopy-lidar inversion algorithm and the related uncertainties.

A synthesis of the uncertainty sources has been performed. The lidar-derived tree top height (TTH) is obtained with an uncertainty of ~ 1.2 m. The lidar-derived highest tree top height (HTTH) appears to be in good agreement with the one derived from the field measurements. The lidar-derived quadratic mean canopy height (QMCH), for a plot of $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ compatible with spaceborne measurements, has an uncertainty of $\sim 10\%$, which depends on the lidar SNR and to a lesser extent on the accuracy of geolocation measurements.

As a demonstration, the AGC has been assessed from the lidar-derived QMCH for forest plots of $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ on the sampling site. Such an assessment allowed us to take into account the main uncertainty sources based on the QMCH (ε_{QMCH}), the field measurements ($\varepsilon_{AGC40_field}$) and the calibration between the QMCH and the AGC ($\varepsilon_{AGC40_lidar}$), following the recommendations provided by Zolkos *et al.* [14] about the lidar measurements applied to forest studies. The AGC of the sampling site has been retrieved as $\sim 95.5 \text{ tC ha}^{-1}$ with a spatial variability of 9 tC ha^{-1} , and an uncertainty of $\sim 16 \text{ tC ha}^{-1}$ ($\sim 16\%$). It is comparable with that of previous independent works operated on the same forest type (e.g., [39]), which shows that our uncertainty study has been conducted for a realistic amount of the AGC. The comparison of lidar measurements between winter and summer enable the assessment of the leaf effect on the AGC. By using the lidar calibration for winter, there is an overestimation of $\sim 50\%$ on AGC estimate in summer. However, a linear relationship has been found between the QMCH retrieved with and without leaves on the same sampling area that offers the capability of using calibration obtained during only one season to retrieve the AGC during the other.

Acknowledgments

The experiment has been funded by the Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) and the Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA). We are also grateful for the support offered by the Direction Générale de l'Armement (DGA). Philippe Ciais is acknowledged for his support for the airborne measurements above Fontainebleau. We thank Kamel Soudani and Eric Dufrêne for fruitful discussions. We also express our thanks to Jean-Yves Pontailler and Daniel Berveiller and all those involved in the field inventory data collection and data processing. Fabien Marnas and Julien Totems are also acknowledged for their help during the lidar experiments. We also acknowledge François Dulac, James Ryder and Cecilia Garrec for reviewing the final form of this article.

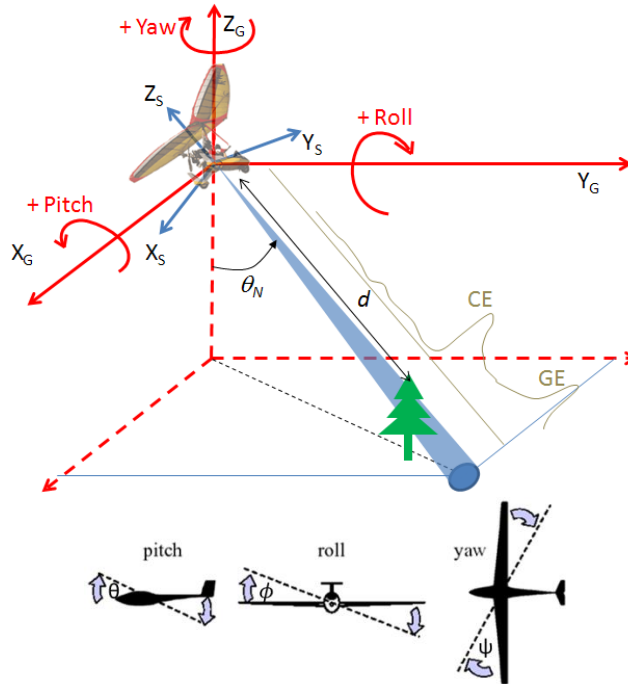
Author Contributions

Both authors contributed extensively to the work presented in this paper.

Appendix A: Lidar Ground-Track Location (Geolocation)

The geolocation of each footprint is needed because the laser beams were not always emitted with a nadir direction due to slight ULA flight fluctuations. For this calculation, Euler-angles have been introduced where ϕ , θ and ψ are the rotating angles around roll, pitch and yaw axis, respectively (Figure A1).

Figure A1. Representation of three angles (yaw, pitch and roll) between the actual lidar line of sight and the nadir direction. Both the sensor-fixed coordinate system (X_S, Y_S, Z_S) and the local tangent plane coordinate system (X_G, Y_G, Z_G) are given. The distance d is defined between the echo (*i.e.*, CE or GE) and the ULA.



On the one hand, the distances represented by the length of the lidar profiles varied slightly according to the emission angle θ_N between the actual lidar line of sight and the nadir direction. θ_N only depends on the roll- and pitch-angle as follows:

$$\theta_N = \cos^{-1}(\cos \theta \cdot \cos \phi) \quad (\text{A1})$$

The TTH has to be corrected from the emission angle θ_N . It is easily calculated from its raw value (TTH_r) by:

$$TTH = TTH_r \cdot \cos \theta_N \quad (\text{A2})$$

On the other hand, the location of the footprint has been calculated using both the geolocation and the attitude of the ULA. First of all, the measured information recorded by the MTi-G system could be expressed as a vector $V_S = (0 \ 0 \ -d)$ in the Sensor-fixed coordinate system (X_S, Y_S, Z_S), where d is the distance along the line of sight between the target and the ULA (Figure A1). Secondly, a rotation matrix R_{GS} has been introduced so that the vector V_S is rotated to be $V_G = (x_G \ y_G \ z_G)$ (Equation (A3) and Equation (A4)) in the local tangent plane coordinate system (X_G, Y_G, Z_G), which is a Cartesian

earth-fixed coordinate system whose X -axis is aligned with the geographic North, Z is defined in the Up direction, and Y is the right handed coordinates (West). As a result, the locations of footprints given by V_G could be retrieved by:

$$V_G = R_G V_S = (R_{SG})^T V_s \quad (A3)$$

$$R_G = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\psi & \sin\phi \sin\theta \cos\psi - \cos\phi \sin\psi & \cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi \\ \cos\theta \sin\psi & \sin\phi \sin\theta \sin\psi + \cos\phi \cos\psi & \cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi \cos\theta & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \quad (A4)$$

Thirdly, by introducing the location of the ULA (Latitude and Longitude measured by the GPS), the locations of footprints could be represented in terms of latitude (λ_F) and longitude (ϕ_F) by:

$$\begin{cases} \lambda_F = \lambda_{ULA} + \frac{x_G}{R+z} = \lambda_{ULA} - d \frac{\cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi}{R+z} \\ \phi_F = \phi_{ULA} - \frac{y_G}{(R+z)\cos(\lambda_{ULA})} = \phi_{ULA} + d \frac{\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi}{(R+z)\cos(\lambda_{ULA})} \end{cases} \quad (20)$$

where R is the mean Earth radius ($R \sim 6371$ km) and z is the ULA altitude above mean sea level (amsl).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest. This is a scientific study using a UV spaceborne demonstrator, which has no commercial goal.

References

1. Anonymous. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Geneva, Switzerland, 2013; Chapter 6, pp. 465–570.
2. Gibbs, H.K.; Brown, S.; Niles, J.O.; Foley, J.A. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: Making REDD a reality. *Environ. Res. Lett.* **2007**, *2*, 045023.
3. MacArthur, R.H.; MacArthur, J.W. On Bird Species Diversity. *Ecology* **1961**, *42*, 594–598.
4. Lefsky, M.A.; Cohen, W.B. Lidar remote sensing of above- ground biomass in three biomes. *Glob. Ecol. Biogeogr.* **2002**, *11*, 393–399.
5. Brown, S.; Pearson, T.; Slaymaker, D.; Ambagis, S.; Moore, N.; Novelo, D.; Sabido, W. Creating a virtual tropical forest from three-dimensional aerial imagery to estimate carbon stocks. *Ecol. Appl.* **2005**, *15*, 1083–1095.
6. Cuesta, J.; Chazette, P.; Allouis, T.; Flamant, P.H.; Durrieu, S.; Sanak, J.; Genau, P.; Guyon, D.; Loustau, D.; Flamant, C. Observing the Forest Canopy with a New Ultra-Violet Compact Airborne Lidar. *Sensors* **2010**, *10*, 7386–7403.
7. Allouis, T.; Durrieu, S.; Chazette, P.; Bailly, J.S.; Cuesta, J.; Véga, C.; Flamant, P.; Coutron, P. Potential of an ultraviolet, medium-footprint lidar prototype for retrieving forest structure. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2011**, *66*, S92–S102.

8. Garvin, J.; Bufton, J.; Blair, J.; Harding, D.; Luthcke, S.; Frawley, J.; Rowlands, D. Observations of the earth's topography from the Shuttle Laser Altimeter (SLA): Laser-pulse echo-recovery measurements of terrestrial surfaces. *Phys. Chem. Earth* **1998**, *23*, 1053–1068.
9. Harding, D.J.; Lefsky, M.A.; Parker, G.G.; Blair, J.B. Laser altimeter canopy height profiles methods and validation for closed-canopy, broadleaf forests. *Remote Sens. Environ.* **2001**, *76*, 283–297.
10. Brenner, A.C.; Zwally, H.J.; Bentley, C.R.; Csathó, B.M.; Harding, D.J.; Hofton, M.A.; Minster, J.-B.; Roberts, L.; Saba, J.L.; Thomas, R.H.; *et al.* Derivation of Range and Range Distributions From Laser Pulse Waveform Analysis for Surface Elevations, Roughness, Slope, and Vegetation Heights. In *Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) Algorithm Theoretical Basis Document*, Version 4.1; Goddard Space Flight Center: Greenbelt, MD, USA, 2003; pp. 1–92.
11. Schutz, B.E.; Zwally, H.J.; Shuman, C.A.; Hancock, D.; DiMarzio, J.P. Overview of the ICESat Mission. *Geophys. Res. Lett.* **2005**, *32*, doi:10.1029/2005GL024009.
12. Harding, D.J. ICESat waveform measurements of within-footprint topographic relief and vegetation vertical structure. *Geophys. Res. Lett.* **2005**, *32*, doi:10.1029/2005GL023471.
13. Lefsky, M.A.; Harding, D.J.; Keller, M.; Cohen, W.B.; Carabajal, C.C.; Del Bom Espirito-Santo, F.; Hunter, M.O.; de Oliveira, R. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. *Geophys. Res. Lett.* **2005**, *32*, L22S02.
14. Zolkos, S.G.; Goetz, S.J.; Dubayah, R. A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing. *Remote Sens. Environ.* **2013**, *128*, 289–298.
15. Wulder, M.A.; White, J.C.; Bater, C.W.; Coops, N.C.; Hopkinson, C.; Chen, G. Lidar plots—A new large-area data collection option: Context, concepts, and case study. *Can. J. Remote Sens.* **2012**, *38*, 600–618.
16. Le Toan, T.; Quegan, S.; Davidson, M.W.J.; Balzter, H.; Paillou, P.; Papathanassiou, K.; Plummer, S.; Rocca, F.; Saatchi, S.; Shugart, H.; *et al.* The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote Sens. Environ.* **2011**, *115*, 2850–2860.
17. Means, J.E.; Acker, S.A.; Harding, D.J.; Blair, J.B.; Lefsky, M.A.; Cohen, W.B.; Harmon, M.E.; McKee, W.A. Use of large-footprint scanning airborne Lidar to estimate forest stand characteristics in the western cascades of Oregon. *Remote Sens. Environ.* **1999**, *67*, 298–308.
18. Grant, R.H.; Heisler, G.M.; Gao, W.; Jenks, M. Ultraviolet leaf reflectance of common urban trees and the prediction of reflectance from leaf surface characteristics. *Agric. For. Meteorol.* **2003**, *120*, 127–139.
19. Ceccaldi, M.; Delanoë, J.; Hogan, R.J.; Pounder, N.L.; Protat, A.; Pelon, J. From CloudSat-CALIPSO to EarthCare: Evolution of the DARDAR cloud classification and its comparison to airborne radar-lidar observations. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2013**, *118*, 7962–7981.
20. Sugimoto, N.; Nishizawa, T.; Shimizu, A.; Okamoto, H. AEROSOL classification retrieval algorithms for EarthCARE/ATLID, CALIPSO/CALIOP, and ground-based lidars. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Vancouver, BC, USA, 24–29 July 2011; pp. 4111–4114.

21. Ansmann, A.; Wandinger, U.; Le Rille, O.; Lajas, D.; Straume, A.G. Particle backscatter and extinction profiling with the spaceborne high-spectral-resolution Doppler lidar ALADIN: Methodology and simulations. *Appl. Opt.* **2007**, *46*, 6606–6622.
22. Andersson, E.; Dabas, A.; Endemann, M.; Ingmann, P.; Källén, E.; Offiler, D.; Stoffelen, A. *ADM-AEOLUS: Science Report*; Clissold, P., Ed.; ESA Communication Production Office: Noordwijk, The Netherlands, 2008.
23. Air Création. Available online: <http://www.aircreation.fr> (accessed on 13 June 2014).
24. Chazette, P.; Sanak, J.; Dulac, F. New approach for aerosol profiling with a lidar onboard an ultralight aircraft: Application to the African Monsoon Multidisciplinary Analysis. *Environ. Sci. Technol.* **2007**, *41*, 8335–8341.
25. Quantel. Available online: <http://www.quantel-laser.com/> (accessed on 13 June 2014).
26. National Instruments. Available online: <http://france.ni.com/> (accessed on 13 June 2014).
27. Xsens. Available online: <http://www.xsens.com/> (accessed on 13 June 2014).
28. ONF. Available online: <http://www.onf.fr/> (accessed on 13 June 2014).
29. Le Maire, G.; Davi, H.; Soudani, K.; François, C.; Le Dantec, V.; Dufrêne, E. Modeling annual production and carbon fluxes of a large managed temperate forest using forest inventories, satellite data and field measurements. *Tree Physiol.* **2005**, *25*, 859–872.
30. Corif. Available online: <http://www.corif.net/site/sitesobs/> (accessed on 13 June 2014).
31. Lefsky, M.A.; Harding, D.; Cohen, W.B.; Parker, G.; Shugart, H.H. Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Remote Sens. Environ.* **1999**, *67*, 83–98.
32. Chazette, P.; Pelon, J.; Mégie, G. Determination by spaceborne backscatter lidar of the structural parameters of atmospheric scattering layers. *Appl. Opt.* **2001**, *40*, 3428–3440.
33. Measures, R.M. *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*; Wiley, J., Ed.; Krieger Publishing Company: Malabar, FL, USA, 1984; p. 510.
34. MacArthur, R.H.; Horn, H.S. Foliage Profile by Vertical Measurements. *Ecology* **1969**, *50*, 802–804.
35. Brown, S. Measuring carbon in forests: Current status and future challenges. *Environ. Pollut.* **2002**, *116*, 363–372.
36. De Dhôte, J.-F.; De Hercé, É. Un modèle hyperbolique pour l’ajustement de faisceaux de courbes hauteur–diamètre. *Can. J. For. Res.* **1994**, *24*, 1782–1790.
37. Vallet, P.; Dhôte, J.F.; Moguédec, G.L.; Ravart, M.; Pignard, G. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *For. Ecol. Manag.* **2006**, *229*, 98–110.
38. Boudreau, J.; Nelson, R.F.; Margolis, H.A.; Beaudoin, A.; Guindon, L.; Kimes, D.S. Regional aboveground forest biomass using airborne and spaceborne LiDAR in Québec. *Remote Sens. Environ.* **2008**, *112*, 3876–3890.
39. Casella, G.; Berger, R.L. *Statistical Inference*, 2nd ed.; Duxbury Press: Pacific Grove, CA, USA, 2001; pp. 240–245.
40. Vallet, P.; Meredieu, C.; Seynave, I.; Bélouard, T.; Dhôte, J.F. Species substitution for carbon storage: Sessile oak *versus* Corsican pine in France as a case study. *For. Ecol. Manag.* **2009**, *257*, 1314–1323.

41. Mitchard, E.T.A.; Saatchi, S.S.; White, L.J.T.; Abernethy, K.A.; Jeffery, K.J.; Lewis, S.L.; Collins, M.; Lefsky, M.A.; Leal, M.E.; Woodhouse, I.H.; *et al.* Mapping tropical forest biomass with radar and spaceborne LiDAR in Lopé National Park, Gabon: Overcoming problems of high biomass and persistent cloud. *Biogeosciences* **2012**, *9*, 179–191.
42. Stephens, P.R.; Watt, P.J.; Loubster, D.; Haywood, A.; Kimberley, M.O. Estimation of carbon stocks in New Zealand planted forests using airborne scanning LiDAR. *IAPRS* **2007**, *XXXVI*, Part 3/W52.
43. Næsset, E.; Gobakken, T.; Solberg, S.; Gregoire, T.G.; Nelson, R.; Ståhl, G.; Weydahl, D. Model-assisted regional forest biomass estimation using LiDAR and InSAR as auxiliary data: A case study from a boreal forest area. *Remote Sens. Environ.* **2011**, *115*, 3599–3614.

© 2014 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>).

3.3.2. Compléments d'étude

3.3.2.1. Utilité des arbres dominants

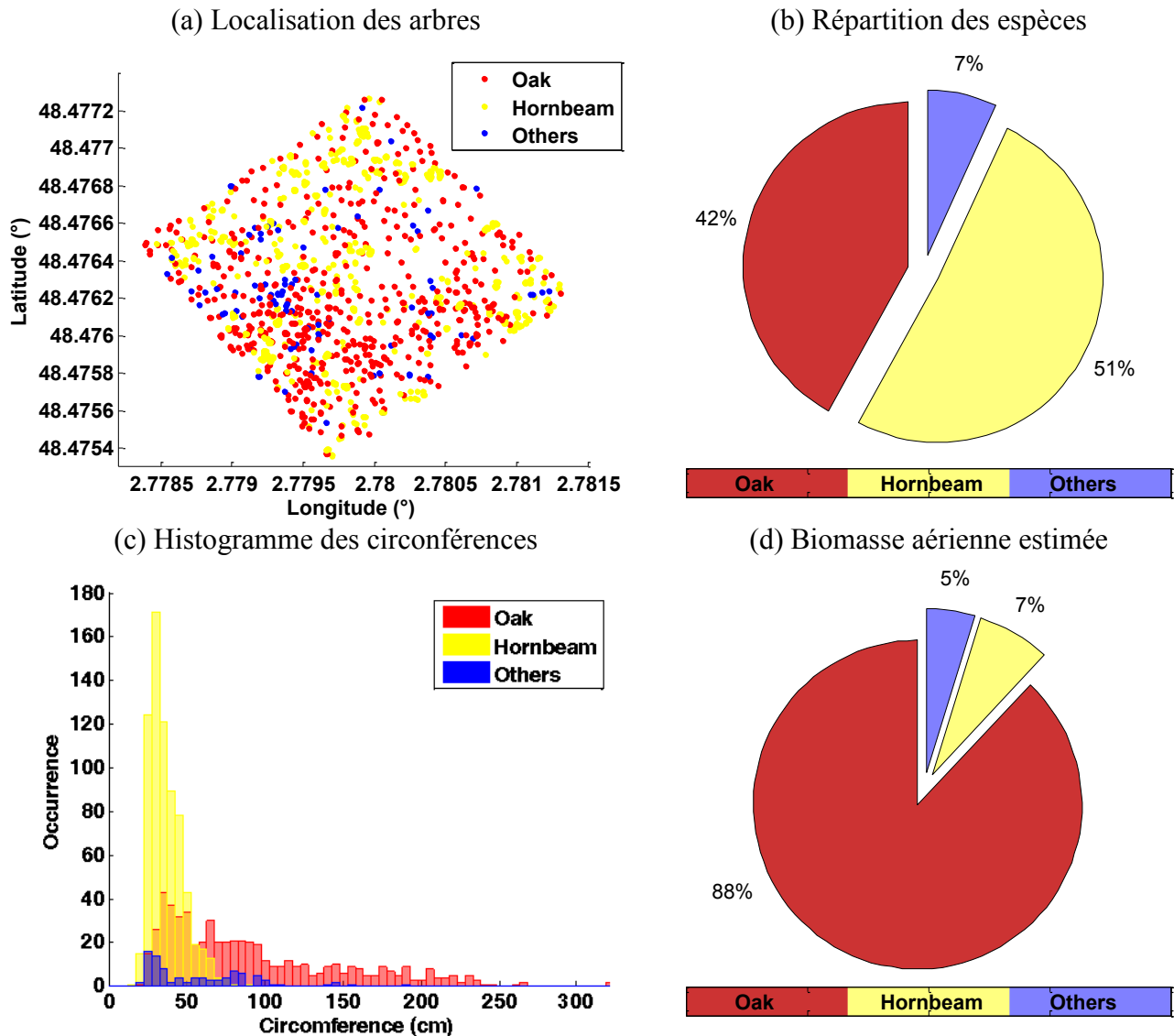


Figure 3.18. (a) Localisation des arbres dans le site centrale de Barbeau. (b) Répartition des espèces sur Barbeau. (c) Distribution des circonférences des arbres. (d) Répartition de la biomasse aérienne estimée. Les couleurs représentent les différentes espèces d'arbre (Rouge : chêne / Oak, Jaune : charme / Hornbeam, Bleu : autres espèces³ / Others).

Dans l'article présenté précédemment, seulement les arbres dominants (les chênes, « oaks » en anglais) sont utilisés pour le calcul de la biomasse du site. Les 1372 arbres dans la zone centrale du site de Barbeau ont été bien documentés à partir de mesures *in situ* : les localisations, les espèces et les circonférences de tous les arbres. A ceci s'ajoute les hauteurs de 134 arbres qui ont été échantillonnés afin de bien représenter la dynamique des structures arborées du site. Leur localisations est données sur la Figure 3.18a et la répartition des espèces sur la zone est montrée sur la Figure 3.18b. Les espèces principales sont le chêne et le charme. Les charmes sont les plus nombreux (51%). Néanmoins, en regardant la distribution des circonférences des différents arbres (Figure 3.18c), les grandes

³ Les autres espèces sont composées par (le pourcentage est donné dans la parenthèse) : Alizier (2.7%), Tremble (2.48%), Pin (0.73%), Aubépine (0.36%), Houx (0.22%), Néflier (0.15%), Merisier (0.15%), Hêtre (0.07%)

circonférences, qui correspondent aux arbres les plus grands, sont plutôt associées à des chênes. En appliquant la loi allométrique utilisée précédemment, la biomasse aérienne a été estimée par espèce (Figure 3.18c). On voit que les chênes sont les principaux contributeurs à la biomasse aérienne (88%). C'est pour cette raison que l'on peut considérer uniquement les arbres dominant pour étudier la biomasse d'un site comme celui de Barbeau.

Evidemment, le site de Barbeau ayant été documenté auparavant, il est plus aisé de déterminer l'espèce d'arbre dominant et de se concentrer sur elle. Pour des sites peu ou pas documentés, comme c'est le cas de forêts non entretenues, cet exercice est plus délicat et l'évaluation des incertitudes associées n'est pas immédiate.

3.3.2.2. Utilité de la QMCH (hauteur quadratique moyenne)

Dans l'article précédent, les QMCHs ont été utilisées pour évaluer la biomasse, mais pourquoi ne pas utiliser directement les HTTHs (hauteur d'arbre la plus haute) sachant qu'il y a un très bon accord entre les mesures lidar et les relevés *in situ* comme cela est montré dans la section 3.2.3.1 ? Ce choix a été effectué suite à différentes études de sensibilité aux différents paramètres forestiers.

Une relation entre les HTTHs et la quantité de biomasse aérienne (AGB) a été établie à partir des relevés *in situ* pour des parcelles de 10 m × 10 m. Comme le montre la Figure 3.19 il apparaît bien une relation biunivoque. Par contre, la courbe ajustée est saturée pour les HTTHs élevées (~30 m). Effectivement, les HTTHs de l'ordre de 30 m où la courbe s'approche de la saturation, avec les incertitudes associées, peuvent correspondre à une plage énorme en terme de biomasse, allant de 100 à 300 tC·ha⁻¹. L'utilisation de cette relation pour les arbres de grande taille, donc matures, vient donc ajouter beaucoup d'incertitude sur l'évaluation de la biomasse aérienne. Comme nous l'avons montré précédemment, ce n'est pas le cas de la relation reliant la QMCH à l'AGB.

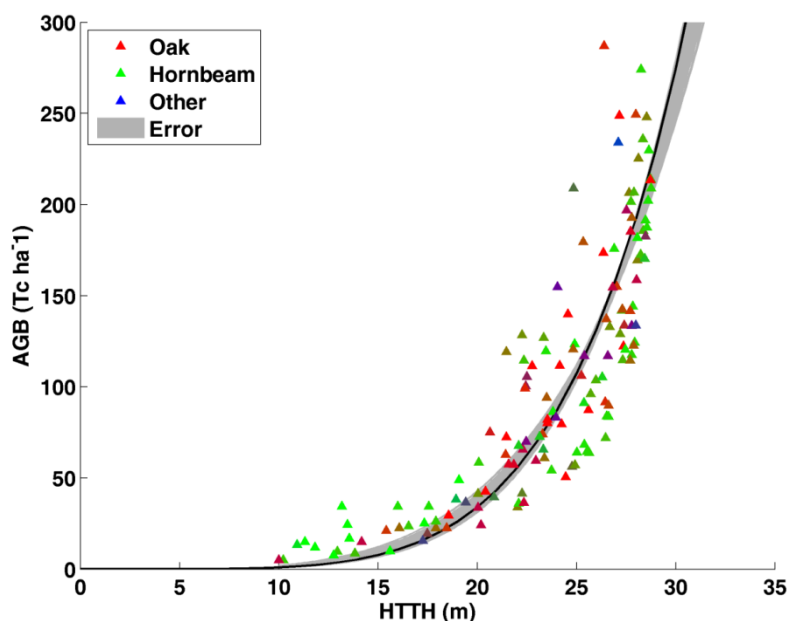


Figure 3.19. Biomasse de la forêt de Barbeau estimée, selon les relevés *in situ* dans des parcelles de 10 m × 10 m, tracée en fonction de la hauteur d'arbre la plus haute dans chaque parcelle (HTTH). Le trait noir représente la courbe ajustée. Les couleurs correspondent à la répartition des espèces d'arbres: plus on va vers le rouge (vert) et plus la population est composée de chêne (charme). L'écart type associé à l'incertitude sur les mesures *in situ* est donnée par la zone en grisée.

3.4. Épaisseur optique de la forêt (FOT)

Les premières applications de l'épaisseur optique de la forêt, « Forest optical thickness » (FOT) en anglais, vont être présentées dans cette section. La FOT prend en compte l'ensemble du profil lidar dans le couvert forestier comme elle est calculée à partir de profil vertical de coefficient d'extinction du milieu forestier. Le calcul de la FOT est présenté dans la section 2.3.2.4. A partir de ce paramètre, il est possible de faire une estimation du LAI (Leaf Area Index).

Les données disponibles pour avaliser cette approche sont peu nombreuses, nous avons donc utilisé les données de MODIS à des fins de comparaison sur les zones forestières ou il y a de grande couverture spatiale des mesures lidar.

3.4.1. Leaf Area Index (LAI)

J'ai choisi d'utiliser le produit MOD15A2 (Knyazikhin et al., 1999) qui fournit des données globales tous les 8-jours. C'est un produit de niveau-4 qui donne, entre autres, les valeurs du LAI à l'échelle globale pour une résolution horizontale de 1 km.

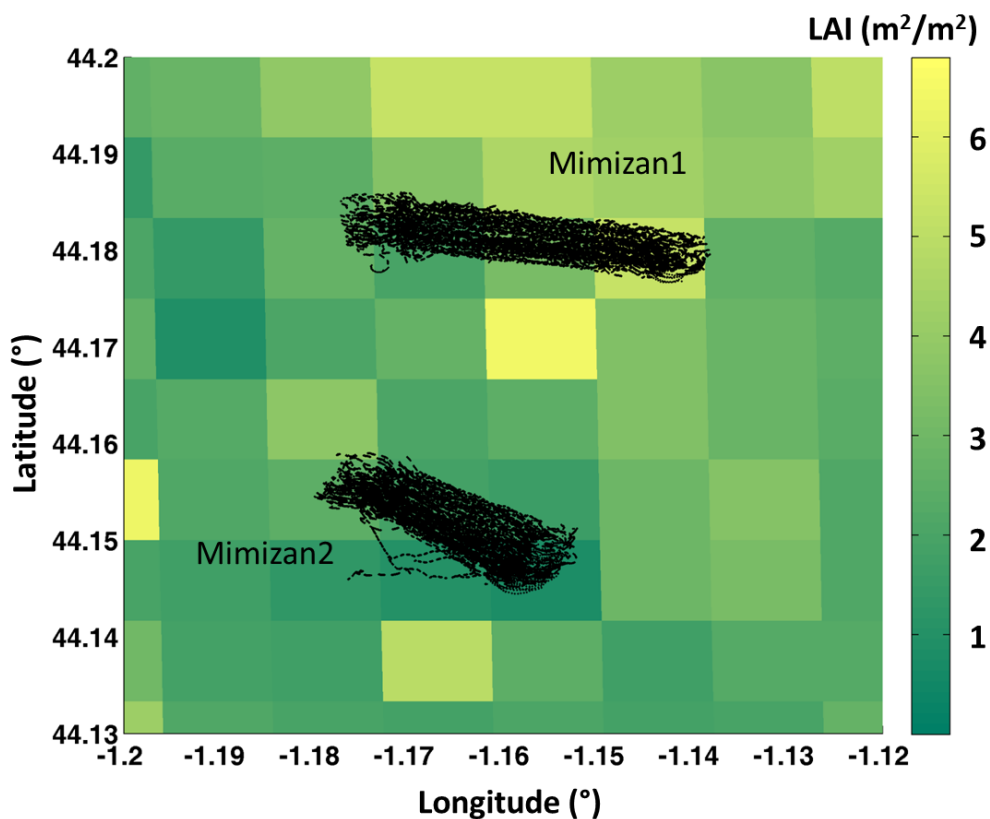


Figure 3.20. Localisations des mesures lidar durant l'expérience aéroportée sur la forêt des Landes. Elles sont représentées sur une carte de LAI de 1 km de résolution dérivée de mesures avec le capteur spatial MODIS.

On a considéré, dans un premier temps, les données lidar aéroportées qui avaient été acquises sur la forêt des Landes (c.f. la section 3.2.1). A partir des LAI déduits des mesures MODIS, on peut constater que c'est une forêt peu dense, avec un LAI maximum de $5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ pour la zone d'étude de surface ~ 100 ha. Les localisations des mesures lidar au sol sont données sur la Figure 3.20, qui montre que les mesures lidar couvrent une grande partie de certains pixels MODIS. Pour chaque pixel MODIS, les

valeurs de FOT extraites sur tous les profils lidar sont moyennées. Puis les 9 FOT correspondant aux 9 pixels MODIS significatifs (4 pour Mimizan1 et 5 pour Mimizan2) sont comparés avec les valeurs de LAI MODIS associées. Le résultat est donné sur la Figure 3.21. Bien qu'on ait peu de points de comparaison avec une résolution horizontale de 1 km, le résultat apparaît comme très prometteur. En regardant la courbe ajustée présentée sur la Figure 3.21, on note un biais. C'est probablement parce que MODIS considère toutes les structures présentes dans chaque pixel, y compris les bâtiments et les champs, mais que nos mesures lidar couvrent uniquement les arbres.

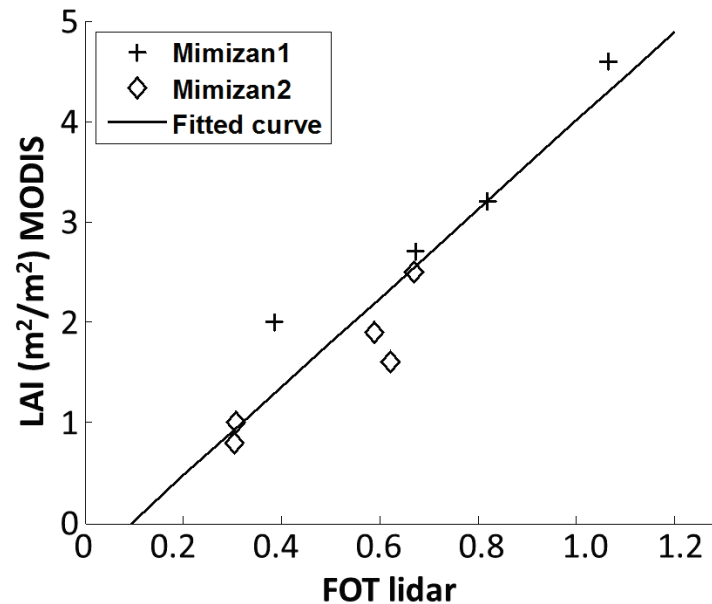


Figure 3.21. Comparaison entre les FOT calculées à partir des mesures lidar et les LAI estimés via MODIS pour des pixels de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ sur la forêt des Landes.

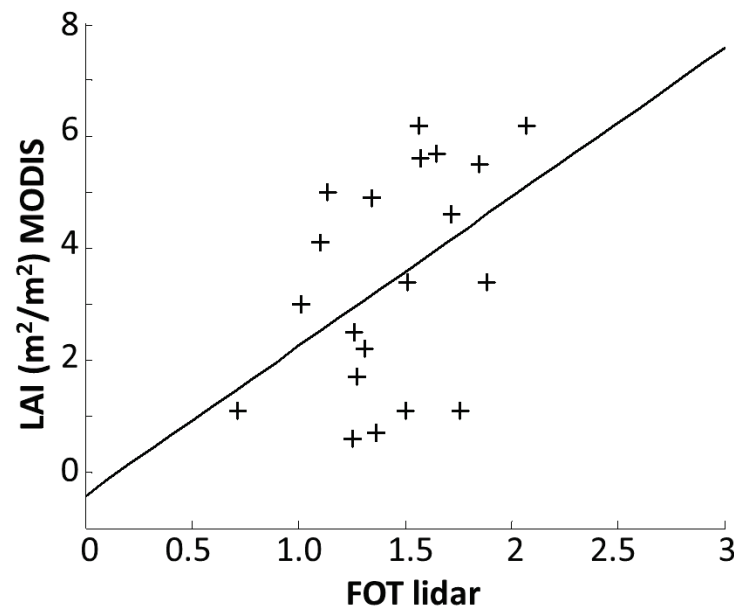


Figure 3.22. Comparaison entre les FOT calculés par les mesures lidar et les LAI estimés via MODIS pour les parcelles de $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ sur la forêt de Fontainebleau.

Ce type d'étude a été reconduit avec les données obtenues sur la forêt de Fontainebleau (c.f. la section 3.2.3). C'est une forêt plus dense que la forêt des Landes, donc avec des LAI plus élevés (jusqu'à $7 \text{ m}^2/\text{m}^2$, en limite de saturation). La relation entre les FOT lidar et les LAI MODIS est donnée sur la

Figure 3.22. Cette relation semble moins bonne que celle obtenue sur la forêt des Landes. C'est peut-être à cause de la mauvaise détection des structures arborées venant d'une pénétration plus faible du laser dans le couvert forestier, comme le discuté dans la section 3.2.3. La saturation du LAI dérivé de la mesure MODIS peut également expliquer une partie de la plus grande dispersion des points.

Les courbes d'ajustement pour les 2 forêts précédentes ne sont pas le même. Ceci pourrait laisser penser que les valeurs des coefficients liant le LAI à la FOT dépendent du type de forêt (e.g. Tang et al., 2012).

Une étude détaillée du LAI à partir des mesures lidar sur une forêt tropicale sera présentée dans le chapitre 4.

3.4.2. De la FOT (épaisseur optique de la forêt) au NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

La relation entre le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) et le LAI est déjà bien connue, comme cela est montré sur la Figure 3.23 obtenue par Wu (2014) par exemple. Nous avons effectué ce genre d'étude pour la forêt des Landes (c.f. la section 3.2.1), parce que la résolution du NDVI MODIS est meilleure que celle du LAI MODIS.

Le produit de niveau-3 MOD13Q1 (Huete et al., 1999) fournit des synthèses globales tous les 16-jours. Il donne les valeurs du NDVI à l'échelle globale avec une résolution horizontale de 250 m.

Les valeurs moyennes de FOT lidar sont donc extraites pour les pixels de 250 m × 250 m sur les sites de Mimizan1 et Mimizan2 afin de les comparer aux valeurs de NDVI MODIS associées. Le résultat est donné sur la Figure 3.24. Nous pouvons trouver une tendance décrivant une relation entre le NDVI MODIS et la FOT lidar. Ce type d'étude se doit d'être approfondi et peut s'inscrire dans le cadre des perspectives de ce travail de thèse.

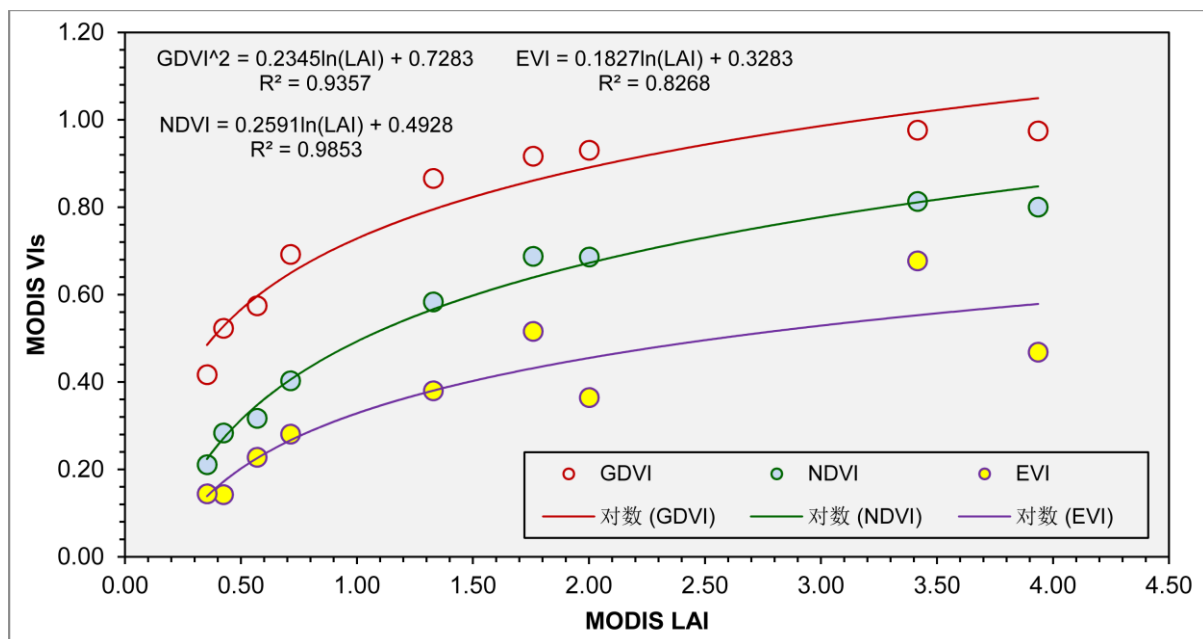


Figure 3.23. Relations entre les trois indices de végétation et le LAI dans la base de données de MODIS. Ces 3 indices de végétation sont : Normalized Difference Vegetation Index (NDVI, en vert), Enhanced Vegetation Index (EVI, en jaune) et Generalized Difference Vegetation Index (GDVI, en rouge). (Wu, 2014)

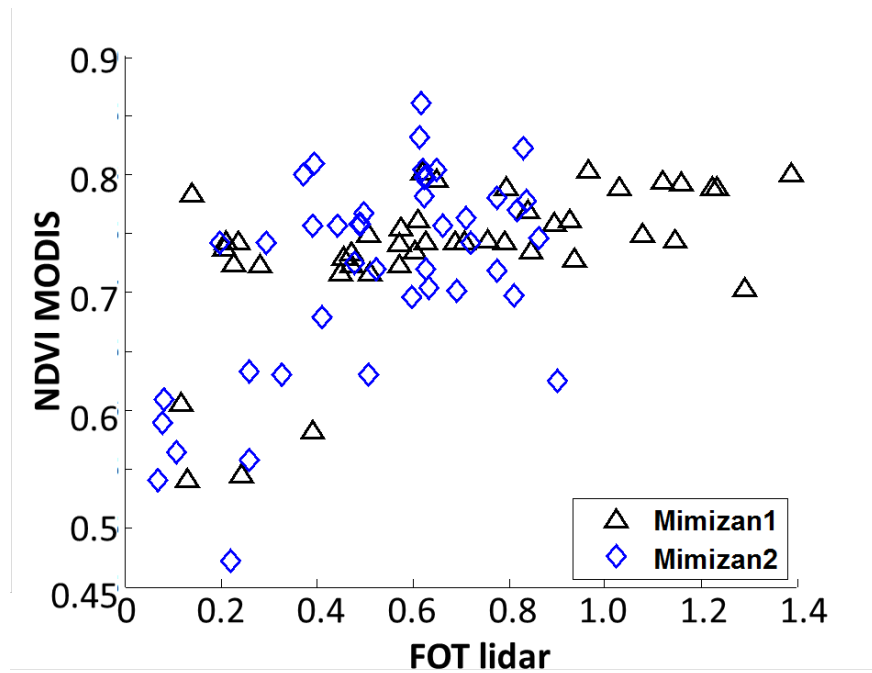


Figure 3.24. Comparaison entre les FOT calculées à partir des mesures lidar et les NDVI estimés via MODIS pour les pixels de $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ disponibles sur la forêt des Landes.

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté 3 paramètres structuraux et optiques (la hauteur d'arbre-TTH, la hauteur quadratique moyenne-QMCH, l'épaisseur optique de la forêt-FOT) importants pour la caractérisation des couverts forestiers. Ces paramètres ont été montrés comme directement accessibles à partir des mesures lidar aéroportées. Ils permettent d'envisager une évaluation de la quantité de biomasse aérienne, comme cela a été démontré dans ce chapitre à partir d'une campagne expérimentale conduite au-dessus et aux abords de la forêt de Fontainebleau. Différents autres sites forestiers du territoire français ont également été échantillonnés pour lesquels la mesure lidar aéroportée a permis de restituer les structures internes. Il faut noter que pour conduire ces différentes campagnes expérimentales, auxquelles j'ai fortement contribué, c'est un système lidar ultraviolet qui a été utilisé. Ce système a démontré sa capacité pour répondre à nos attentes scientifiques.

L'étude complète que j'ai conduite, pour l'évaluation de la quantité de biomasse aérienne et du bilan d'erreur associé, a montré que l'on peut espérer une précision absolue de $16\text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}$ pour la restitution de la biomasse aérienne d'une forêt de moyenne-latitude par lidar aéroporté. La valeur moyenne de la biomasse retrouvée est en parfait accord avec les résultats dérivés par d'autres auteurs pour le même type de forêt. Mais, cette étude a été conduite sous la condition de terrain plat, et d'arbres sans feuille (durant l'hiver). J'ai néanmoins pu établir, dans le cas des chênes de Fontainebleau, que l'on pouvait trouver une relation biunivoque entre les QMCH d'arbres avec et sans feuilles. Le type de couvert influence fortement le signal lidar. C'est donc aussi à partir des données lidar que j'ai conduit une première étude de classification des types de couvert. J'ai utilisé une approche par décomposition sur une base de modes gaussiens. Les résultats se sont révélés en accord avec les relevés *in situ* effectués

sur la forêt de Barbeau. Ce type d'approche complémentaire permet de mieux comprendre la structuration spatiale de la forêt.

J'ai également présenté les premières études sur le LAI (Leaf Area Index) et le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) en relation avec la FOT déduite de la mesure lidar aéroportée. J'ai utilisé pour cela les observations du capteur MODIS. Ces inter-comparaisons, bien que basées sur des instruments de résolutions horizontales très différentes, a fait apparaître des relations qui se devront d'être confirmées par des expériences spécifiques. En fin, il est bon de noter que la FOT pourrait être un paramètre plus facilement intégrable dans les modèles de biosphère, il pourrait même y être assimilé.

Nos travaux ont été limités jusqu'ici à des échelles locales pour des sites forestiers de moyenne latitude. Nous savons pertinemment que l'un des grands enjeux des études sur le climat est une meilleure connaissance du système forestier tropicale et une vision à l'échelle globale des couverts forestiers. J'ai développé ces différents points dans le cadre de mes travaux de thèse et ils seront présentés dans les deux prochains chapitres, en commençant par l'extension à la forêt tropicale.

4 Evaluation en forêt tropicale

4.1. Introduction

Les études qui ont été présentées dans le chapitre précédent se sont reposées sur des observations lidar acquises au-dessus de sites forestiers de moyenne latitude, en France métropolitaine. Ces sites correspondent généralement à des forêts entretenues auxquelles il est facile d'accéder pour réaliser des mesures *in situ* de référence (par exemple pour effectuer un étalonnage de la mesure lidar afin d'en déduire la quantité de biomasse aérienne). La densité des sites forestiers de moyenne latitude, qui est peut être caractérisée par l'épaisseur optique de la forêt (FOT) est variable, mais se trouve plutôt proche de 1. Bien que ces sites soient intéressants à étudier car potentiellement récepteurs du gaz carbonique atmosphérique lié aux émissions anthropiques, nous avons vu qu'ils ne représentent pas le stock forestier le plus important. Ce dernier est plutôt associé aux forêts tropicales.

Il y a environ 14.5 millions d'hectares de forêt tropicale qui disparaissent dans le monde depuis le dernier siècle. C'est autant d'enrichissement des émissions de gaz carbonique, sans compter que le rôle de régulation de la forêt sur de nombreux gaz en trace ou de la vapeur d'eau s'en trouve très fortement perturbé. Il était donc important dans le cadre de ce travail de thèse de disposer d'échantillonnages lidar sur des sites forestiers tropicaux.

Avec les moyens à notre disposition dans l'état actuel de la situation socio-économique mondiale, et en tenant compte des délais très courts dont nous disposons, notre choix s'est orienté vers les forêts tropicales de l'île de La Réunion. Ce travail s'est inscrit dans le cadre du programme national DELICE (Définition et Etude de l'échantillonnage spatiale d'un Lidar Canopée à moyenne Empreinte) qui est soutenu par le CNES et le CEA. Les avantages pour conduire une telle expérience sur l'île de La Réunion sont multiples :

- Des forêts dont les localisations au sol sont bien définies car elles poussent sur d'anciennes coulées de lave. On a donc potentiellement une meilleure localisation de l'écho de sol, surtout pour les forêts tropicales humides du sud de l'île. De plus, l'âge des arbres est très bien identifié en cas de besoin.
- Il y a un nombre d'espèce limitées, une cinquantaine environ, ce qui rend plus aisée les mesures sur le terrain et leur comparaison aux observations lidar aéroportées.
- Il y a des forêts tropicales de caractéristiques très variables comme cela sera montré dans la section suivante. La variabilité est beaucoup liée à la position en altitude des placettes forestières. Les densités de « feuillage » et de sous-bois sont très variables.
- On dispose d'un modèle numérique de terrain à 5 m de résolution au sol déduit d'un altimètre laser embarqué sur hélicoptère et qui est mis à disposition par le parc national de La Réunion (grand merci Jean-Cyrille Notter).
- On dispose d'un fort support technique par nos relations avec l'OSU-Réunion. Les équipes qui travaillent sur les lidar de l'observatoire de La Réunion collaborent souvent avec notre groupe.
- Les travaux qui ont été conduits grâce à la mesure lidar aéroporté motivent fortement les naturalistes et biologistes de l'université de La Réunion. Les équipes de l'université de La Réunion, du Parc naturel de La Réunion, de l'ONF et du CIRAD apportent leur concours et ont fortement complétées les mesures de terrain.

A tout s'ajoute un élément important associé aux mesures de protection mises en place par les autorités afin de préserver et de reconstruire le patrimoine forestier de La Réunion. En effet, menacées par les activités humaines et/ou par des espèces exotiques envahissantes, les forêts de La Réunion retrouvent par endroits leur aspect originel grâce à l'intervention humaine et surtout depuis le classement de l'île au patrimoine mondial de l'humanité par l'UNESCO.



Figure 4.1. Survole des forêts tropicales d'altitude de Bélouve (a) et humide de Mare-Longue (b) en ULM (prises de vue P. Chazette)

Deux environnements forestiers ont surtout attiré notre attention car jugés représentatifs de ce que l'on peut trouver à plus grande échelle en région tropicales. Ce sont les sites de Bélouve et de Mare-Longue (Figure 4.1). Le site de Bélouve est un parfait représentant de forêts tropicales d'altitude dites « tropicales montane cloud forests » car souvent surplombées de nuages. Elles ne sont donc pas toujours accessibles à l'observation par télédétection. Elles ne sont par ailleurs pas plus facile d'accès

pour des opérateurs au sol. On y trouve en général des arbres de taille comprise entre 10 et 15 m, mais qui peuvent présenter des diamètres atteignant ou dépassant le mètre (Figure 4.2). Pour ce qui est de la forêt tropicale humide de La Réunion, elle a pratiquement disparu. Elle ne s'étend plus que sur moins de 3 000 ha au lieu des 44 000 ha qu'elle occupait avant l'arrivée de l'homme (Cadet and Figier, 1989). La destruction de la forêt humide réunionnaise a été très rapide, puisque moins de deux cent ans après la colonisation de l'île, la majeure partie de la forêt humide de basse altitude est remplacée par la culture du Café, puis de la Canne à Sucre. Aujourd'hui, la plupart des reliques de forêts de basse altitude se trouvent dans la commune de St- Philippe. La forêt de Mare-Longue en est une des plus remarquables et parmi les plus préservées. Elle contient des arbres pouvant atteindre une trentaine de mètres.



Figure 4.2. Coupe de bois en lisière de la forêt de Bélouve (prise de vue P. Chazette)

Ce chapitre est construit autour d'un article que je viens de finaliser et qui sera soumis à une revue internationale à comité de lecture. On commence par y présenter les objectifs scientifiques, puis les moyens mis en œuvre pour discuter les résultats obtenus à partir des mesures lidar aéroportées effectuées au-dessus de 7 sites forestiers contrastés de l'île de La Réunion. Nous verrons qu'à partir de notre expérience acquise pour l'échantillonnage des forêts de moyenne latitude, nous avons révisé les caractéristiques d'émission du laser afin de disposer d'une tâche au sol de plus grande dimension. En augmentant la taille de la tâche au sol nous cherchons à accroître le nombre de profils lidar à partir desquels il sera possible d'extraire la hauteur et la structure interne de la canopée forestière tropicale.

4.2. Article : Tropical forests of Réunion Island observed by airborne lidar

Tropical forests of Réunion Island observed by airborne lidar

X. Shang^{a,*}, P. Chazette^a, J. Totems^a, E. Dieudonné^a, E. Hamonou^a, Valentin Duflot^b, Dominique Strasberg^c, Olivier Flores^d, Jacques Fournel^c, and Pierre Tulet^b

^a Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement (LSCE), Commissariat à l'Energie Atomique et aux énergies alternatives—Centre National de la Recherche Scientifique—Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Gif sur Yvette Cedex 91191, France.

^b Laboratoire de l'Atmosphère et Cyclones (LACy), Université de la Réunion, CNRS, Météo-France, 15 avenue René Cassin, CS 92003, 97744 Saint-Denis Messag. Cedex 9, La Réunion, France.

^c Université de La Réunion, UMR PVBMT, Peuplements Végétaux et Bioagresseurs en Milieu Tropical, 15 avenue R. Cassin, CS 92003, 97744 Saint-Denis Messag. Cedex 9, La Réunion, France.

^d UMR PVBMT, Peuplements Végétaux et Bioagresseurs en Milieu Tropical, Université de la Réunion, Pôle de Protection des Végétaux, 7, chemin de l'IRAT, 97410 Saint Pierre, La Réunion, France.

* Corresponding author. Tel.: +33 1 69 08 78 89.
E-mail address: xiaoxia.shang@gmail.com (X. Shang).

Abstract

This paper reports on the first study by a full-waveform airborne lidar of varied tropical forests of the French Réunion Island. Tropical forests are vital ecosystems widely threatened across the globe and yet remain the most difficult forest type to document. We present an experiment performed over La Réunion Island in May 2014, on sites ranging from coastal to rain forest, including tropical montane cloud forest as found on the Bélouve plateau. La Réunion Island is home to the last remnants of primary tropical forest in the Mascarene archipelago, and still shelters significant biodiversity. Three key ecological parameters have been extracted from the lidar measurements: the canopy height (CH), the forest leaf area index (LAI) and the apparent foliage profile. The mean values of estimated LAI are between ~ 5 and $8 \text{ m}^2/\text{m}^2$ and the mean CH values are $\sim 15 \text{ m}$ for both tropical montane cloud and rain forests. Good agreement is found between Lidar- and MODIS-derived LAI for moderate LAI, but the LAI retrieved from lidar is larger than MODIS on thick rain forest sites (~ 8 against $\sim 6 \text{ m}^2/\text{m}^2$ from MODIS). Regarding the characterization of tropical biomes, we show that the rain and montane tropical forests can be well distinguished from planted forests by the use of the three ecological parameters retrieved by lidar.

Keywords: tropical forest, airborne lidar, canopy height, leaf area index, apparent foliage

1. Introduction

It is estimated that the terrestrial biosphere absorbs a quarter of the carbon dioxide anthropogenic emissions. Representing 80% of the continental biospheric carbon, forests play a crucial role in Earth's carbon cycle by absorbing carbon dioxide from the atmosphere and storing it into biomass (IPCC, 2014). Among other factors, the capacity of forests to stock carbon depends on latitude and floristic composition (Coomes et al., 2014), and is therefore maximal in the intertropical zone. Hence, tropical rainforests in particular act as a major component of carbon sequestration. Yet, because of their tremendous heterogeneity and complex structure, major uncertainties remain in the quantity of aboveground living biomass stored in tropical forests (e.g. Gibbs et al., 2007).

Forests are also a major component of water vapor regulation in the low atmosphere (Black et al., 1996; Greco & Baldocchi, 1996) and an important actor of cloud formation. They are important sources and sinks for several atmospheric chemical species because they exchange, among others, volatile organic compounds (Lathi  re et al., 2005), sulfides, ozone (Tsigaridis & Kanakidou, 2003) and aerosol precursors (Guenther et al., 2006; Karl et al., 2010) with the atmosphere. The impact of these exchanges on atmospheric processes remains however largely unknown. What is clear is that it crucially depends on forest properties such as living biomass, composition and spatial structure. Measuring the three-dimensional vegetation structure of tropical forests is thus essential to address this issue, as such structure contains a substantial amount of information about the state of development of plant communities (Brown & Parker, 1994; Hollinger, 1989; Horn, 1971; Lefsky et al., 1999a, 1999b; Wagner et al., 2008) and their potential to interact with the low troposphere.

Tropical forest areas are nonetheless difficult to be monitored from the ground, mostly because of a lack of infrastructure. Forest horizontal patterns are accessible using passive multispectral sensors (Franklin et al., 2000; Popescu et al., 2001) and hyper-spectral sensors (Etteieb et al., 2012; Hilton et al., 2012; Huesca et al., 2013), but these sensors are not adequate to penetrate beyond the upper canopy layer (Hyde et al., 2006). However, active remote sensing instruments, including lidar and radar, can peer through the forest canopy down to the ground level (e.g. Beets et al., 2011). Recent developments in P-Band radar technology and data processing techniques show promise to accurately estimate forest aboveground biomass with a larger spectrum of values (Balzter et al., 2007; Garestier et al., 2008; Toan et al., 2004). Nevertheless, radar yields information rather in volume than in surface due to its wavelength, and is less efficient to render the forest vertical structure than lidar.

Spaceborne lidar systems are powerful candidates to monitor forest structure at both regional and global scales, as shown by the ICESat mission for instance (Ballhorn et al., 2011; Hayashi et al., 2013; Schutz et al., 2005; Simard et al., 2011). In particular, a dedicated airborne backscatter lidar could provide a full description of the forest vertical structure (including canopy top, tree crown base height and understory structures) (e.g. Cuesta et al., 2010; Shang & Chazette, 2014). Recently, the airborne demonstration instrument called LVIS, for Laser Vegetation Imaging Sensor (Blair et al., 1999), has shown that a full waveform infrared lidar with a large footprint can reliably extract the vertical structure of a tropical rainforest (Costa Rica, Tang et al., 2012) as well as a mid-latitude forest (California, Tang et al., 2014), even with a dense canopy cover. The LVIS team however acknowledges the need of a broader dataset on multiple tropical biomes to confirm these findings and compare the extracted features.

The overarching goal of this paper is to report on a first full-waveform airborne lidar study of varied tropical forest types, including primary forest and plantations. We will highlight the differences in extracted ecological features between tropical forest systems existing on Réunion Island, which range from coastal to rain forest, including montane cloud forest. As such, this work responds to the

need for diversity raised by Tang et al. (2012), when studying an homogenous tropical forest in central America.

The instrumental set-up will be described in section 2, where the interest of the sampled area will also be presented. Section 3 will recall the main steps of lidar processing for forest studies. The results in terms of forest structural parameters and the representativeness of the horizontal sampling will be discussed in section 4. The retrieved forest ecological and structural properties will be analyzed in section 5. Comparisons with ground-based census will be also presented in this section.

2. Experimental set up

The work presented hereafter is based on a lidar instrument and an airborne sampling strategy which have already been used successfully in previous experimental campaigns (Cuesta et al., 2010; Shang & Chazette, 2014). The airborne lidar works in the ultraviolet (UV) spectral domain, which leads to a significant reduction of the multiple scattering effects in forest structures compared to longer wavelengths. Learning from past experiments, the lidar system has been improved to allow measurements with a larger, controllable laser footprint and thus increase its ability to detect the ground echo under dense canopy. It has been integrated into an autonomous payload flown on an Ultra-Light Aircraft (ULA).

2.1. Instrumentation

2.1.1. Lidar system

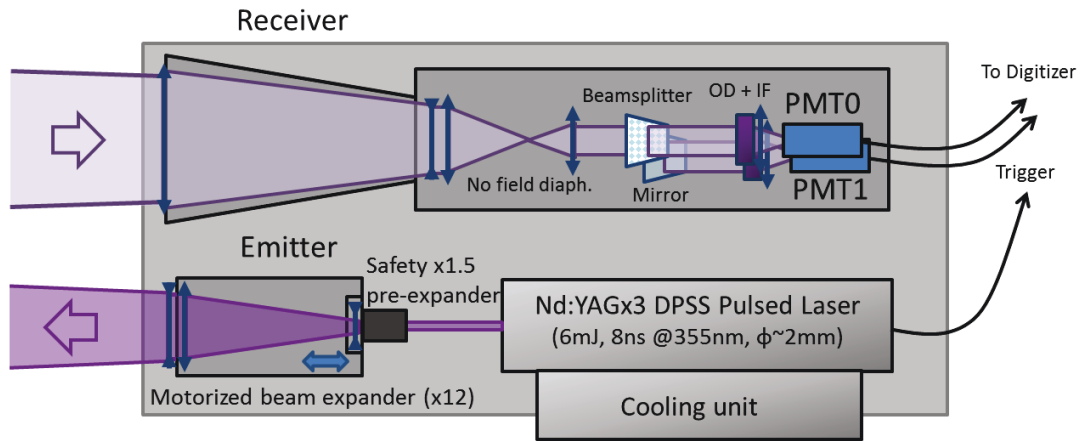


Figure 1. Diagram of ULICE optical head as modified for the Réunion experimental campaign. (OD: Optical Density, IF: Interference Filter, PMT: Photo-Multiplier Tube).

The main instrument used during the campaign is the Ultraviolet Lidar for Canopy Experiment (ULICE; Shang & Chazette, 2014) developed at LSCE with the support of CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), with a modified optical head drawn on Figure 1. Its Quantel/Centurion diode-pumped solid-state laser emits 6 mJ, 8 ns pulses at 355 nm wavelength and 100 Hz repetition frequency. The receiver, composed of a 150 mm diameter refractive telescope and Hamamatsu Photo-Multiplier Tubes (PMTs) behind Interference Filters (IF), collects backscattered light. A two-channel configuration with different Optical Densities (OD) allows for a greater dynamic range of unsaturated signals returns. The laser is internally triggered at maximum frequency for an optimal energy and symmetrical beam profile; however, note that signal acquisition is performed (at 200 MHz sampling

frequency by a National Instruments NI-5924 12 bits / 2 channels digitizer) for only one in three shots because of software latency. Table 1 summarizes the characteristics of the system.

As described in Appendix A, the ULICE system was partly modified to obtain a large and tunable sounding area on the ground (approximately 10 m diameter for a flight altitude of ~350 m above the ground level (agl)), comparable to the overall span of dominant trees, in the hope that ground echoes could be perceived from the optically thinner areas between the trees at each laser shot. The adequate size of the laser footprint was verified experimentally.

Table 1. Summary of ULICE lidar characteristics

ULICE lidar	characteristics
Emitter (Laser)	Quantel Centurion, diode-pumped, air cooled 6 mJ, 8 ns, 100 Hz @ 354.7 nm
Output beam	Eyesafe $\sim 40 \times 30$ mm beam, tunable 0 to 40 mrad divergence with Altechna Motex expander (at $1/e^2$)
Receiver	2 channels with different Optical Densities (OD)
Telescope	Refractive, 150 mm diameter, 280 mm effective focal length
Filtering	No spatial filtering, wideband Thorlabs 355 nm ± 5 nm interference filters for large angular acceptancy (36 mrad)
Field of view	33 mrad for channel #0, 26 mrad for channel #1
Detection	Hamamatsu H10721 photo-multiplier tubes. Channel #0: 3.0 OD, channel #1: 4.0 OD.
Data acquisition	12 bits, 200 MHz sampling, 2 channels NI-5124 digitizer, 33 Hz actual profile frequency
Sounding area	Tunable up to ~ 30 mrad on channel#0, < 22 mrad on channel #1 (at $1/e^2$)

2.1.2. Airborne payload

The ULICE lidar is part of a ~80 kg autonomous payload implemented on a Tanarg Ultra-Light Aircraft (ULA), as shown on Figure 2. Power is supplied by a battery coupled with a 500 W alternator on the ULA engine, through a 1500 W inverter; in this way, payload autonomy is limited only by fuel. The other instruments onboard are:

- A Tetracam ADC-air camera for photosynthesis activity index (NDVI-Normalized Difference Vegetation Index) images over the forest canopy, thanks to green, red, and Near-Infrared (NIR) channels, and its associated time-tagging GPS (Global Positioning System). The NDVI values were normalized to the MODIS NDVI pixel values at the sites in May 2014, so as to avoid bias from cloudy skies and grazing solar illumination.
- A Xsens MTi-G Global Positioning System (GPS) and an Attitude and Heading Reference System (AHRS) are part of the MTi-G system. The 20 Hz GPS measurements track the ULA position with an accuracy of 5 m (MTi-G leaflet, <http://www.xsens.com/>, Table 2). The AHRS consists of sensors on three axes that provide the three Euler angles with 0.7° accuracy (i.e., 3.6 m at the ground for a flight altitude of 300 m agl). With such uncertainties, the study performed at Réunion Island is necessarily statistical, because we cannot distinguish a tree from another.

- A Vaisala PTU-300 pressure/temperature/relative humidity (PTU) probe, for altitude correction and control of the tropical high humidity conditions that could affect the transmittance of lidar optics.

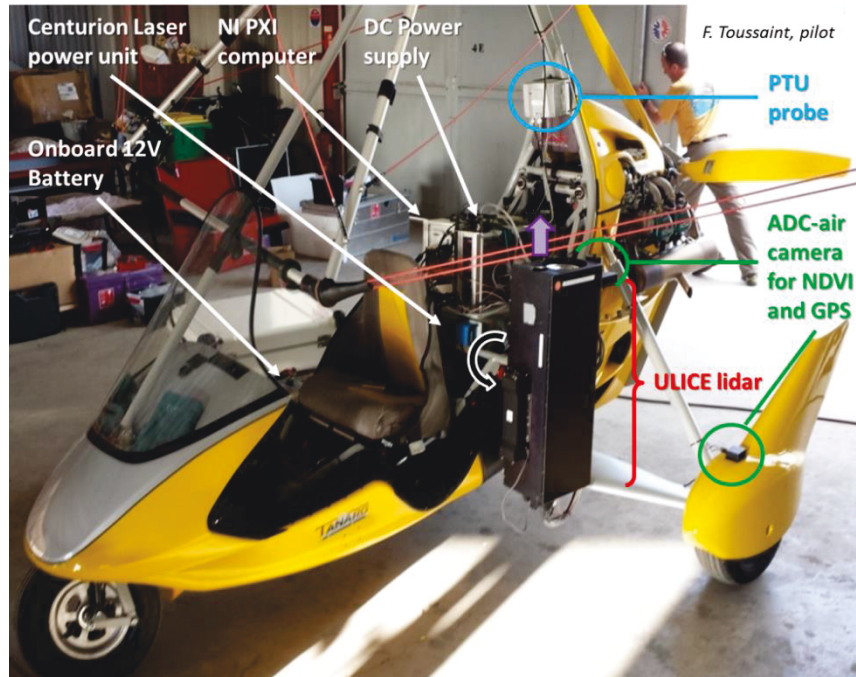


Figure 2. Autonomous payload implemented on an Ultra-Light Aircraft (ULA), including the ULICE lidar, an ADC-air photosynthesis activity camera, a Vaisala PTU-300 pressure / temperature / relative humidity probe, as well as a XSens MTi-G GPS and inclinometer for profile timing and positioning, not seen here.

2.2. Forest sites

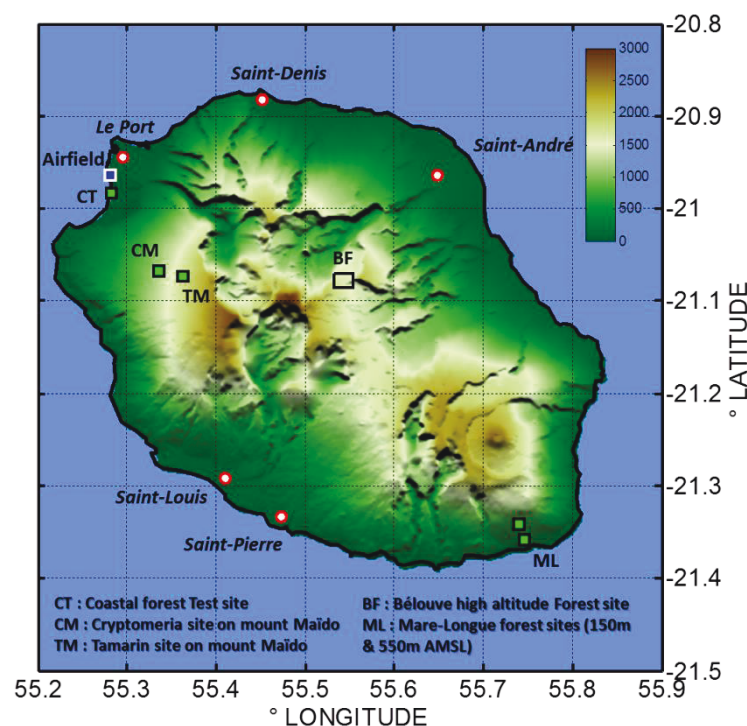


Figure 3. Location of the study sites and topography of La Réunion Island.

Table 2. Main characteristics of the study sites and associated available lidar profiles.

	Forest sites	Location	Altitude (m amsl)	Dominant tree species	Sub-plot	Lidar cover	Laser shots
Exotic vegetation	Coastal forest test site (CT)	20°59'5"S 55°16'56"E	10	Only exotic vegetation	-	22 ha	2046
Tropical montane cloud forests	Cryptomeria site on mount Maïdo (CM)	21°4'3"S, 55°20'13"E	1230	<i>Cryptomeria japonica</i>	40 m×40 m	10 ha	9646
	Tamarind site on mount Maïdo (TM)	21°4'25"S, 55°21'44"E	1750	<i>Acacia heterophylla</i>	40 m×40 m	10 ha	14738
	Bélouve (BF)	21°4'33"S, 55°32'30"E	1600	<i>Acacia heterophylla</i>	-	400 ha	48410
Tropical lowland rainforest	Mare ML-150	21°21'29"S, 55°44'43"E	150	<i>Labourdonnaisia calophylloides</i>	50 m×100 m	2.8 ha	9808
	Longue ML-250	21°21'5"S, 55°44'32"E	250		50 m×50 m	1.4 ha	1552
	natural ML-550	21°20'29"S, 55°44'24"E	550		-	0.7 ha	667

La Réunion is a French overseas department located in the Indian Ocean (20°06'52"S 55°31'57"E; Figure 3). It is a small (2512 km²) tropical volcanic island, which reaches 3070 m in altitude at its highest point (Piton des Neiges). In spite of transformation of its habitats (Strasberg et al., 2005), the island still shelters 100 000 ha of native ecosystems (included in a National park) and is home to the last remnants of intact tropical forests in the Mascarenes archipelago (La Réunion, Mauritius, Rodrigues).

Seven plots were retained for forest sampling. These plots are located in two main forest types that are tropical montane cloud forests and tropical lowland rainforest, setting apart the coastal test site (CT) with only exotic vegetation (Figure 3; Table 2). Tropical montane cloud forests in particular still cover large areas at Réunion island (60 000 ha), extending from 800 to 1900 m above mean-sea-level (amsl) on the windward side and from 1100 to 2000 m amsl on the leeward side of the island. This dense cloud forest type includes large areas of *Acacia* forest (*A. heterophylla*) very similar to *Acacia koa* forests in Hawaii. The Maïdo sites, including *Cryptomeria* (CM) and Tamarind (TM) plots, are located on the leeward side within cultivated forests on moderate slopes. The first one (CM) is a monocultural forest planted with trees of *Cryptomeria japonica*, an introduced species in the Taxodiaceae family. These trees commonly reach 20-25 meters in height on the site; they produce a dense canopy under which light is very scarce. Most *Acacia* stands, like the Maïdo (TM) and Bélouve (BL) sites, are composed of secondary forest and display a monospecific *Acacia* (highland tamarind) canopy with shrubby vegetation in the understory, of which the structure can vary with the intensity of human activities (stock farming in particular). The last site (three plots dubbed ML-150, 250, and 550 according to their altitude) is located in the National Park of La Réunion in the former Mare-Longue nature reserve (MLNR). MLNR shelters the last remnant of lowland tropical rainforest in the Mascarene Islands with around 4 000 mm of yearly rainfall. This lowland forest grows on a non-altered basaltic pahoehoe lava flow dated between four and six centuries old (Cadet & Figier, 1989). This forest displays the greatest tree species diversity on La Réunion Island with an average richness of 40 tree species per hectare (Strasberg, 1996). Whereas average tree height remains very low (15-20 meters), the stem density overreaches 1000 trees / ha (diameter at breast height > 10 cm). The most abundant tree species in the sampled plots is *Labourdonnaisia calophylloides* (Sapotaceae), endemic from the Mascarene Islands.

Representative sub-plots were set up in four forest sites (Table 2), where *in situ* measurements were performed. Within each of these sub-plots, all trees with diameter at breast height (DBH) > 7 cm were identified to the species level. Both the tree top height (TTH) and the DBH were measured using a laser telemeter and forestry measuring tapes, respectively. For trees with multiple stems, each significant stem was recorded individually. The relationships based on these *in situ* measurements of TTH and DBH are presented in Figure 4 (with a log scale in DBH), along with fitted linear allometric curves.

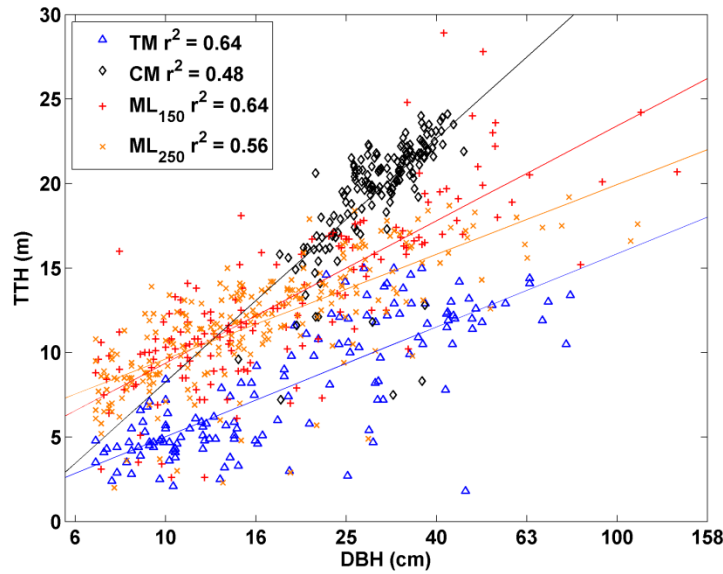


Figure 4: Summary of *in situ* measurements in the documented sub-plots of 4 forest sites in terms of tree top height (TTH) versus diameter at breast height (DBH, on a logarithmic scale).

3. Lidar data processing

In order to characterize the structure of the forest in each of the sampled sites, three key parameters are extracted from the lidar backscatter profiles: the canopy height (CH), the vertical profile of apparent foliage which informs on both the canopy density and the vertical distribution of leaf biomass along the profile and, the leaf area index (LAI) linked to the previous parameter but integrative.

3.1. Canopy height estimation

The CH parameter is directly assessed from the lidar profile using the approach documented in Chazette et al. (2001), and applied to forest detection by Cuesta et al. (2010) and Shang and Chazette (2014). CH is estimated as the distance between the first return at the upper surface of the vegetation and the last return of the ground surface, with a mean uncertainty of ~1.5 m. An example is given in Figure 5. Note that a parasitic echo can be observed beneath the ground echo. It is due to the instrumental impulse response after a strong pulse. The two other parameters are derived from the ranged-corrected lidar signal after assessing the forest optical properties.

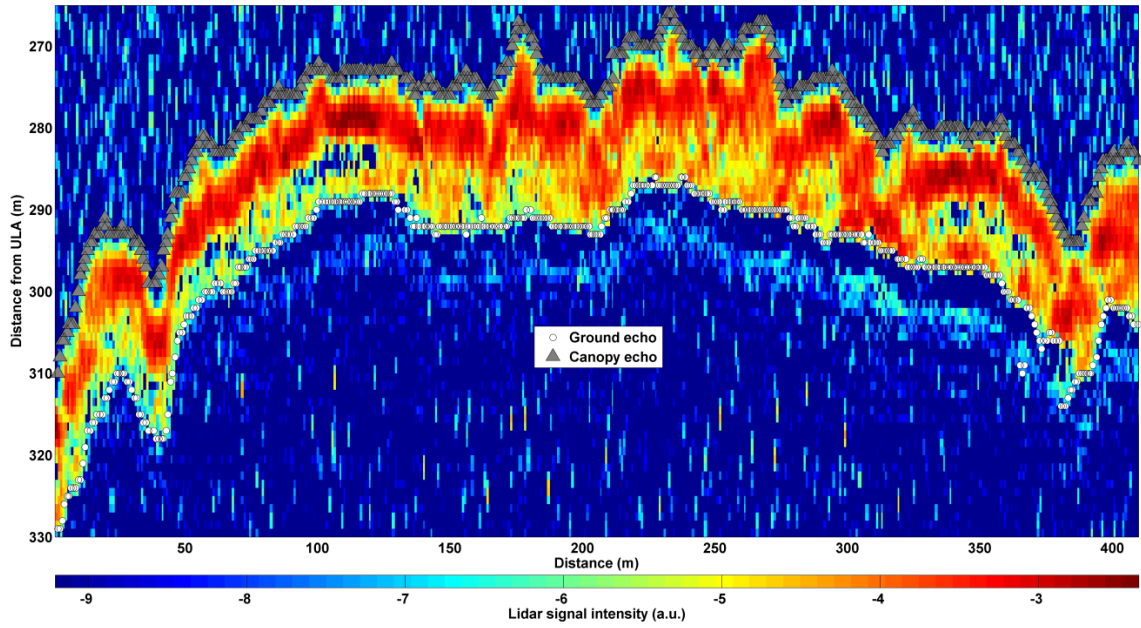


Figure 5. Example of ground-echo and canopy height detection from a range corrected lidar signal explained in arbitrary unit (a.u.) for a section of flight over the tropical forest of Bélouve (BL). The difference between the ranges of these two points yields the canopy height (CH).

3.2. Forest optical parameters

The other useful forest parameters are retrieved from the vertical lidar profiles starting from the lidar equation of the range-corrected signal expressed as (Measures, 1984):

$$S(h) = K \cdot BER \cdot \alpha(h) \cdot T_a^2 \cdot \exp(-2 \cdot FOT(h)) \quad (1)$$

where S is the range corrected lidar signal (Chazette et al., 2012a, 2012b), K is the instrumental constant, T_a is the atmospheric transmission and α is the extinction coefficient in the canopy. The backscatter to extinction ratio BER is a classical parameter used in lidar analyzes (e.g. Chazette et al., 1995). It characterizes the probability that an intercepted photon would be backscattered by a scattering layer. The forest optical thickness FOT is given by:

$$FOT(h) = \int_h^{CH} \alpha(h') \cdot dh' \quad (2)$$

The FOT is defined only in the forest layer between the considered height (h) and the canopy height (CH). In order to retrieve both the FOT and the extinction coefficient, we define the transmittance height profile (THP) which characterizes the sky covered by canopy (Ahmed et al., 2013; Shang & Chazette, 2015):

$$THP(h) = \frac{R_v(h)}{R_v(0)} \quad (3)$$

with:

$$R_v(h) = \int_h^{CH} S(h') \cdot dh' = \frac{1}{2} \cdot [1 - \exp(-2FOT(h))] \quad (4)$$

Thus, THP is also expressed as a function of FOT :

$$THP(h) = \frac{1 - \exp(-2FOT(h))}{1 - \exp(-2FOT(0))} \quad (5)$$

Assuming $FOT(0) \gg 1$, which is realistic for thick tropical forests, an initial FOT estimator is given for $h > 0$ by

$$\widehat{FOT}_i(h) \approx -\frac{1}{2} \cdot \ln(1 - THP(h)) \quad (6)$$

This leads to a second assessment:

$$\widehat{FOT}(h) = -\frac{1}{2} \cdot \ln(1 - \varepsilon \cdot THP(h)) \quad (7)$$

which is made after a correction of the first order using parameter ε explained as:

$$\varepsilon = 1 - \exp(-2 \cdot \widehat{FOT}_i(h_0)) \quad (8)$$

with h_0 chosen inside the undergrowth layer of the forest (2 to 3 m above the ground level).

A final estimate is obtained after correcting for bias towards high values, which can be assessed very reliably using a simulator of the lidar measurements taking inversed profiles for each sampling site as an input. Such an algorithm converges within a relative uncertainty of $\sim 20\%$ after corrections of the bias.

This iterative approach was chosen as an alternative to the one based on ground echo normalization of forest transmittance as proposed by Ni-Meister et al. (2001). The reliance of the latter on an accurate estimate of the ground to vegetation reflectance ratio is incompatible with the very diverse and variable forest grounds found at the Réunion sites (leaves and debris, soil, lava), and leads to important errors on the retrieved ecological parameters.

3.3. Ecological parameters

Several studies have shown that lidar is a powerful instrument to retrieve the leaf area index-LAI (e.g. Farid et al., 2008; Solberg et al., 2009). The LAI can be derived from lidar measurements by (e.g. Ni-Meister et al., 2001):

$$LAI(h) = C \cdot \int_h^{CH} \frac{F_{app}(z)}{G} \cdot dz \quad (9)$$

with

$$F_{app}(h) = \frac{\partial \ln(1 - \varepsilon \cdot \frac{R_p(h)}{R_p(0)})}{\partial h} \quad (10)$$

The LAI is an integration of the apparent foliage (F_{app}). The random orientation of foliage (Ni-Meister et al., 2001) is traduced by $G = 0.5$. Clumping coefficient C has been assessed by Chen *et al.* (1997) around 1.58 using the bidirectional reflectances derived from the Polarization and Directionality of the Earth Reflectance (POLDER, Leroy et al., 1997) instrument onboard the Advanced Earth Observing Satellite (ADEOS), as well as by He et al. (2012) using the MODIS BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) product, yielding $C = 1.54 \pm 0.05$ over most tropical

forests and on La Réunion Island. The LAI here calculated is a crude estimate of the true LAI because it takes into account the contributions of branches and trunks. Tang et al. (2012) considered that the majority of the backscattered energy measured (93%) was due to leaves whereas only 7% came from the rest of the tree. Nevertheless, such a value is not justified in their article and we do not have the capacity to verify this aspect in the current study.

To make a parallel with the method proposed by Ni-Meister et al. (2001), parameter ε can also be found from the energy of the ground echo, knowing the ratio between the ground reflectance (ρ_g) and the vegetation reflectance (ρ_v):

$$\varepsilon = \frac{1}{1 + \frac{\rho_v}{\rho_g} \frac{R_g}{R_v(0)}} \quad (11)$$

where R_g is the integrated lidar ground echo of thickness Δh_0 ($\Delta h_0 \sim 4$ m):

$$R_g(h) = \int_{-\frac{\Delta h_0}{2}}^{+\frac{\Delta h_0}{2}} S(h') \cdot dh' \quad (12)$$

Hence, the reflectance ratio (ρ_v/ρ_g) can be determined using the lidar signal by

$$\frac{\rho_v}{\rho_g} \approx \frac{R_v(0)}{R_g} \frac{\exp(-2 \cdot \widehat{FOT}(h_0))}{1 - \exp(-2 \cdot \widehat{FOT}(h_0))} \quad (13)$$

This inversion process has been applied to each suitable lidar profile acquired during the flights above the tropical forests of La Réunion, in order to characterize the various tropical forest sites.

4. Sampling strategy

Spatial sampling is a key parameter when using airborne lidar to characterize forest plots. Figure 6 gives an overview of the study sites and examples of lidar measurements performed continuously from the ULA. Note that the availability of ground echoes with a good signal-to-noise ratio (SNR) is highly variable with the forest site, depending on the vegetation density or the existence of gaps due to dead trees. We therefore had to adapt the sampling approach or find a representative sample for all the sites.

Weather conditions with almost daily cloud formation over the tropical forest sites, coupled with trade winds or recirculation currents often exceeding $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, forced us to revise our initial sampling strategy of forest sites. It was not realistic to expect ground-traces sufficiently numerous and close to each other to reproduce a 3D vision of forest structures. Nevertheless, we had to check that our samples remained representative.

As illustrated in Figure 7, the horizontal sampling grid during our airborne lidar experiment is defined by three independent parameters: the diameter of the laser footprint (d), the sampling along the ground track of the ULA (ΔX) and the sampling along the perpendicular to the ground track (ΔY). The last one must be more specifically defined as it is based on successive passes of the ULA above the same forest site.

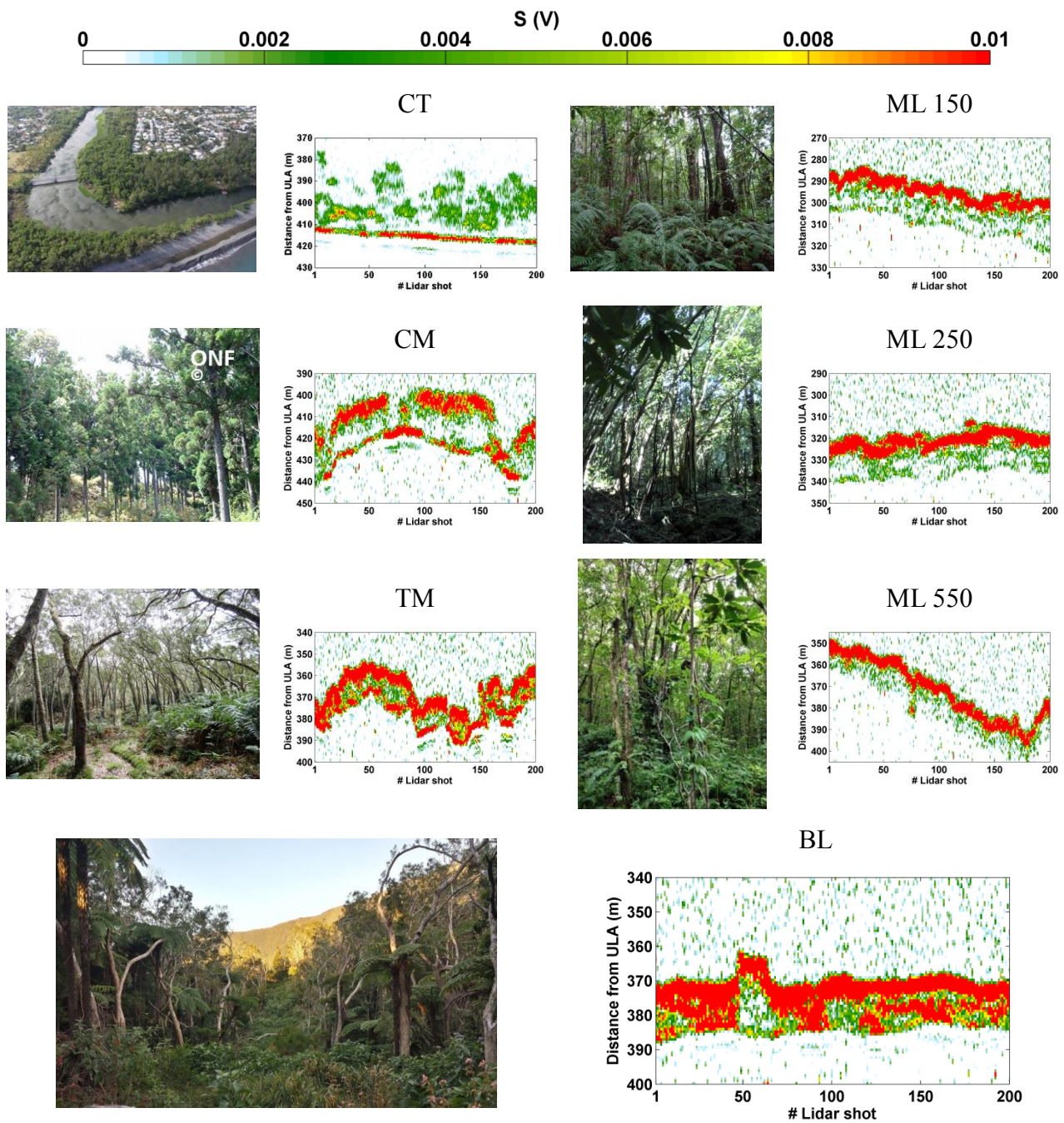


Figure 6: Photos for the 7 studied sites: coastal (CT), Tamarind (TM), Cryptomeria (CM), Bélouve (BF), and Mare-Longue (ML-150, 250 and 550) sites. Examples of continuous lidar measurements performed over the sites are also given.

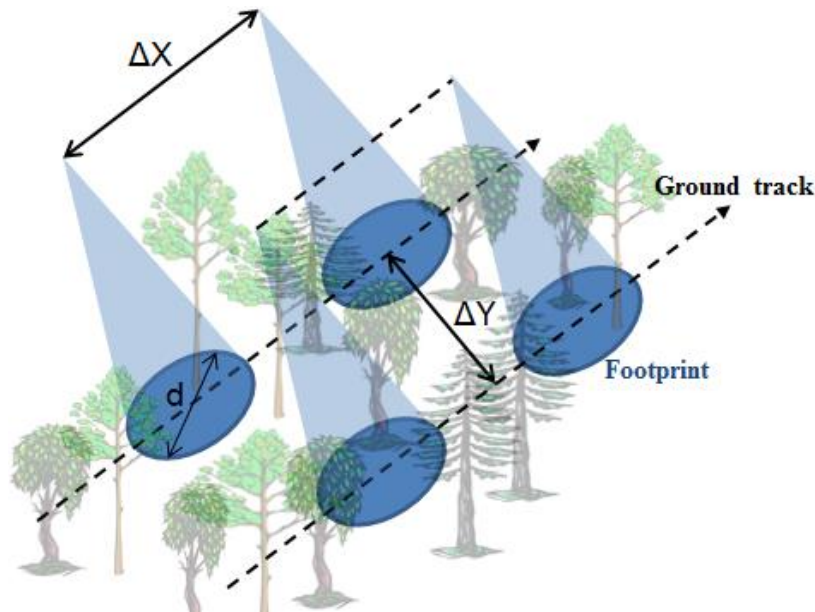


Figure 7: Schematic representation of the lidar sampling: d is the laser footprint diameter, ΔX is the sampling distance along the ground track, and ΔY is the sampling distance perpendicularly to the ground track.

Laser footprint. We performed specific flights to evaluate the influence of the laser footprint size (d) on the retrieval of the ground-echo for a flat surface. The footprint was first modulated using the flight altitude above the coastal forest test site. Three specific flights have also been conducted at the same flight altitude over the Tamarind site with laser footprints of 4, 10 and 20 m, respectively. We note no significant difference in the statistical distributions of tree structures when using laser footprint between 4 and 20 m. The treefall gaps help to identify the ground-echo when using a sufficiently large laser footprint. A laser footprint of ~ 10 m associated with a ~ 300 m flight altitude was therefore considered for the entire sampling campaign. Such a value is adequate for a correct assessment of the LAI as shown by Riano et al. (2004), who found that LAI was better estimated using laser footprints between 7.5 and 12.5 m.

Along-track and cross-track samplings. The influence of the along-track and cross-track sampling distances (ΔX and ΔY) on the horizontal sampling was evaluated, in order to ensure that the sampling was sufficient to accurately retrieve the canopy structure, i.e. the correct CH distribution. On the long flight performed over the Bélouve site (~ 40 km), we assessed the mean value and standard deviation of ΔX to be 0.9 ± 0.5 m (Figure 8). Such a value is fully suitable for sampling dense tropical forest from an airborne lidar. The sampling distance ΔY between each ground track was around 100 times larger than ΔX because a flight pattern including too many overpasses over the forest plot is not feasible. To assess the effect of reducing the horizontal sampling frequency, the CH distribution is computed with artificially increased ΔX values ranging from 1 to 100 m, i.e. using only a fraction of the lidar shots. The results, presented on Figure 9, show that the CH distribution at $\Delta X = 10$ m is similar to the reference CH distribution, which is the one at the native resolution of $\Delta X \sim 1$ m. Moreover, on Figure 9(d), CH histograms appear similar for values of ΔX between 1 and 100 m. Hence the distance ΔY , which is most difficult to keep during the flights, does not significantly affect the statistical studies performed on the different tropical forest sites. These results on the horizontal sampling also demonstrate the strong homogeneity of the dense tropical cloud forest of Bélouve. Note that similar results are obtained for the tropical rain forest of Mare-Longue (not shown).

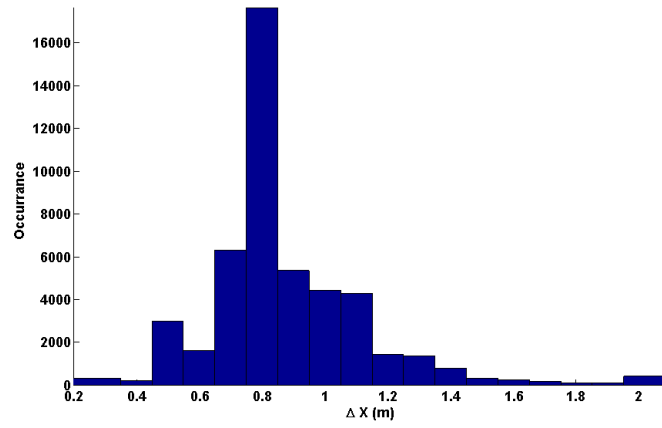


Figure 8. Distribution of the horizontal sampling distance along the ground track of the ULA (ΔX) for the lidar measurements performed on the Bélouve site.

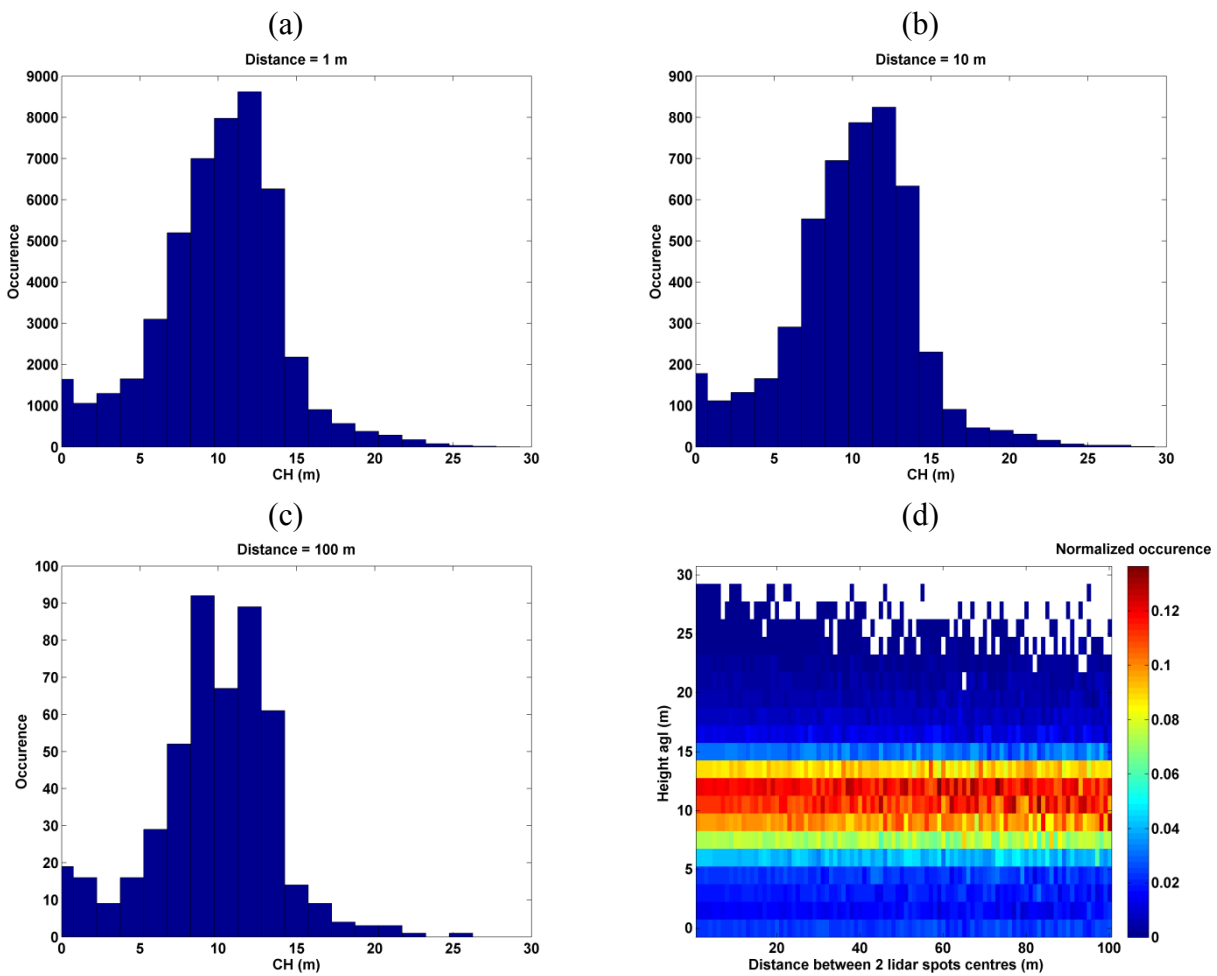


Figure 9. Distribution of the canopy height (CH) computed using a varying fraction of the lidar footprints in order to simulate an effective sampling distance between two consecutive footprints along the ULA ground-track of 1 m (a), 10 m (b) and 100 m (c). The two-dimensional representation is given in (d).

5. Discussion on retrieved tropical forest ecological parameters

Each parameter estimated from the airborne lidar measurements over the tropical forests of La Réunion Island will be analyzed and discussed in this section. The results derived from lidar measurements on the various sites will also be compared.

5.1. Canopy height

5.1.1. Lidar-derived canopy height

The number of available laser profiles on each sampled site is closely related to weather conditions during the experiment (Table 3). The two last sites of the Mare-Longue area are likely insufficiently characterized because the number of samplings is not enough for a reliable statistic. Nevertheless they are also taken into account in Table 3 where the mean, median and maximum values of retrieved CH are given, together with the standard deviation around the mean value. The statistic has been established on ~90% of the lidar profiles, when the ground echoes can be well located. The largest CH values are in the same range on all sites (~30 m) except for ML-250 and 550. The mean and median values are similar, which indicates that there is no significant bias due to outliers in the statistics. The standard deviation is larger than 5 m for the coastal site, pointing out larger differences in terms of tree maturity on these sites. The Cryptomeria site also shows large standard deviation but that is because the sub-plot of interest has uniform tree height (~22 m) and is surrounded with low vegetation. As expected, for the Mare-Longue sites, we observe that CH decreases when their altitude increases. It is less noticeable elsewhere, because tree species vary between plots.

Table 3. Statistics (mean, median, and standard deviation (std)) for both the canopy height (CH) and the assessment of the leaf area index (LAI) on the 7 sites: coastal (CT), Tamarind (TM), Cryptomeria (CM), Bélouve (BF), and Mare-Longue (ML-150, 250 and 550) sites. Profiles with CH < 5 m are not considered. Bold characters highlight the 4 forest sites where in situ measurements are available (see Table 2). The maximal CH derived from the lidar is also indicated. The mean NDVI and its standard deviation derived from both MODIS and the Tetracam ADC-air camera are also given when available.

	CT	TM	CM	BF	ML-150	ML-250	ML-550
Number of samples	1621	12660	5790	42714	9639	1518	658
CH (m)							
Mean	16.2	14.4	15.8	11.4	16.3	15.0	13.2
Median	16.5	15.0	16.5	11.3	17.3	15.0	12.8
Std	5.7	3.1	6.1	3.1	3.8	3.6	2.5
Max	29.3	28.5	29.3	28.5	30.8	24.0	21.0
LAI (m ² /m ²)							
Mean	3.5	4.8	5.0	5.1	7.8	7.5	6.7
Median	2.8	4.2	4.1	4.5	6.7	6.7	5.9
Std	2.7	2.5	3.3	3.0	3.9	3.9	3.7
LAI from MODIS (m ² /m ²)							
Number of pixels (Number of valid observations per pixel)		2 (10)		4 (14)		3 (14)	
Mean	-	5.4		5.1		5.9	
Std	-	0.5		0.4		0.3	
NDVI from Tetracam ADC-air camera & MODIS							
Mean	-	0.64	0.78	0.77	0.85	-	0.84
Std	-	0.05	0.08	0.08	0.06	-	0.06

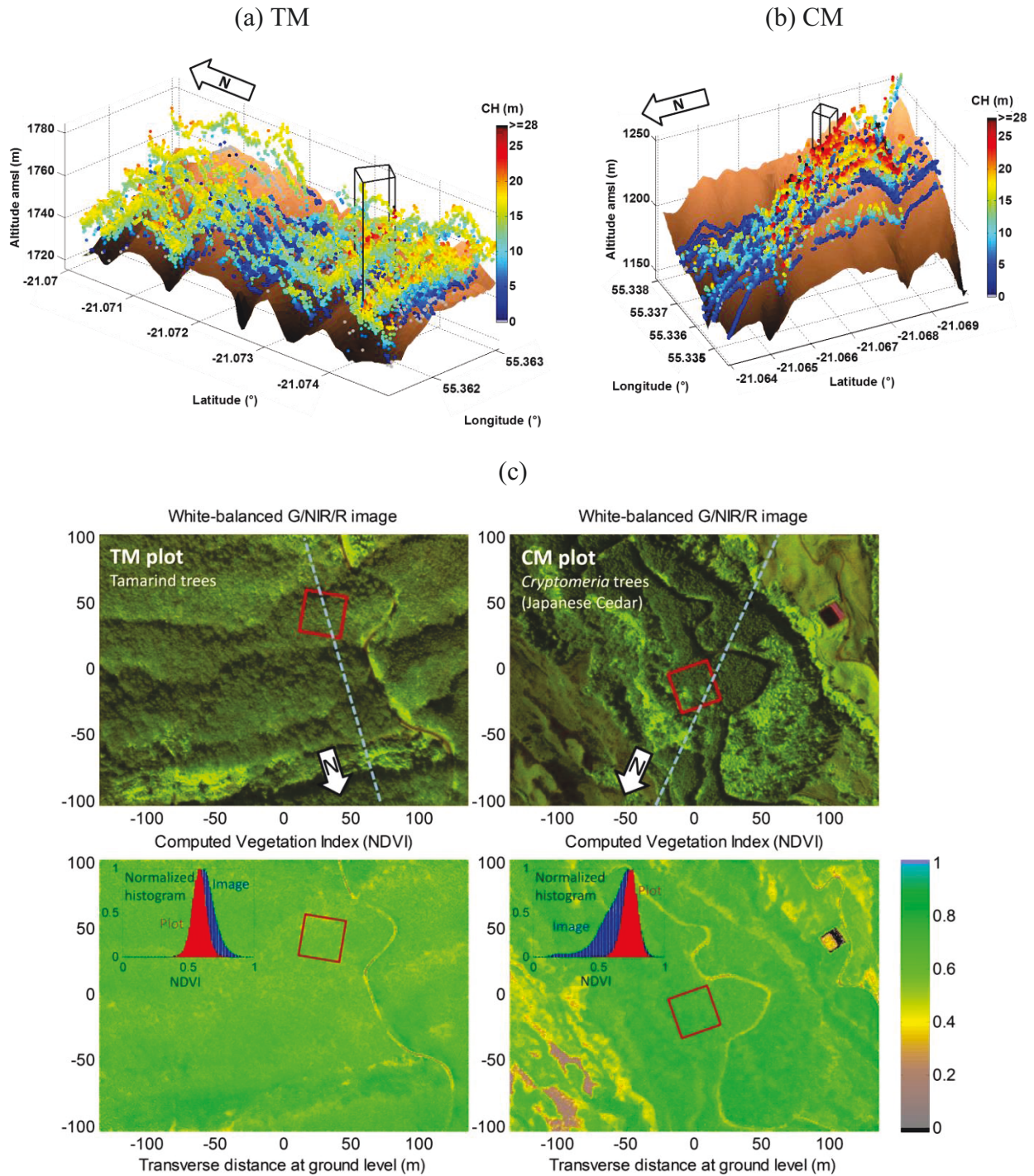


Figure 103. Horizontal samplings performed on the (a) Tamarind (TM) and (b) Cryptomeria (CM) sites with a laser footprint of 10 m. The horizontal samplings distances along and perpendicular to the ground track are ~ 1 and ~ 10 m, respectively. The brown color corresponds to the ground numerical model at 5 m resolution provided by the Parc National de la Réunion (J.-C. Notter, personal communication). The locations of the sub-plots where in situ measurements were performed are highlighted using thick black lines. In (c)-top panel the false color images (for the TM and CM sites, respectively) taken by the ADC-air camera are given, with green/near-infrared/red channels shown as red/green/blue. The red squares show the location of the sub-plots, and the dashed line the mean axis of airborne samplings. The (c)-bottom panel gives the NDVI vegetation index as computed from the images, and histograms for both the selected sub-plot and the background environment seen on the rest of the image.

Figure 10 gives examples of samplings performed over the TM and CM sites with $\Delta X \sim 1$ m and $\Delta Y \sim 10$ m, as well as images of the sites as seen by the ADC-air vegetation camera, which give an overview of the surroundings of the studied plots. The false color images and the NDVI vegetation index computed from these images are informative on the representativeness of the site for the rest of the forest. We see that valleys and clear areas can explain the inhomogeneity in the lidar CH measurements.

5.1.2. Comparison with in situ measurements

In situ measurements were performed in sub-plots of ~ 40 m \times 40 m included in 4 of the seven tropical forest sites (Table 2): the CM, TM, ML-150 and ML-250 sites. In particular, the tree top height (TTH) was measured and its distributions in the sampled sub-plots can be compared with the canopy height (CH) derived from the airborne lidar measurements. The statistical moments are given for each sub-plot in Table 4. The lidar-derived canopy heights are comparable between Table 3 and Table 4 for the TM and ML-150 sites. The normalized distributions, also called probability density functions (PDF), of CH given by lidar and TTH from *in situ* census, are shown in Figure 11. The agreement is quite good between the two distributions for the Cryptomeria site (CM). It is not the case for the others. With a lidar footprint diameter of 10 m, numerous smaller trees are hidden by the higher trees; the lidar-derived PDF is then biased toward the higher trees, whereas ground measurements can underestimate actual TTH as the tree top may not always be well identified because of the complex canopy. It is thus necessary to consider the apparent foliage profile to best identify the underlying trees.

Table 4. Statistics (mean, median, maximal values, and standard deviation (std)) for both the tree top height (TTH) as measured from the ground and the canopy height (CH) retrieved by lidar in sub-plots of 4 forest sites: Tamarind (TM), Cryptomeria (CM), and Mare-Longue (ML-150, 250) sites. The values are given for sub-plots well identified in the main sites (Table 2). All trees with diameters at breast height higher than 7 cm are considered.

	Sub-plot			
	TM	CM	ML-150	ML-250
	21°4'25"S, 55°21'44"E	21°4'3"S, 55°20'13"E	21°21'29"S, 55°44'43"E	21°21'2"S, 55°44'39"E
Location				
Number of lidar profiles	635	245	2371	164
Number of <i>in situ</i> values	176	161	170	259
Lidar CH (m)				
Mean	14.0	22.6	17.9	18.5
Median	13.5	22.5	18.0	18.0
std	2.2	1.8	2.5	1.8
max	21.8	27.8	30.8	23.3
In situ TTH (m)				
Mean	7.5	19.5	12.9	11.8
Median	5.8	20.4	11.8	12.1
std	3.7	3.2	4.8	3.4
max	15	24.1	28.9	19.2

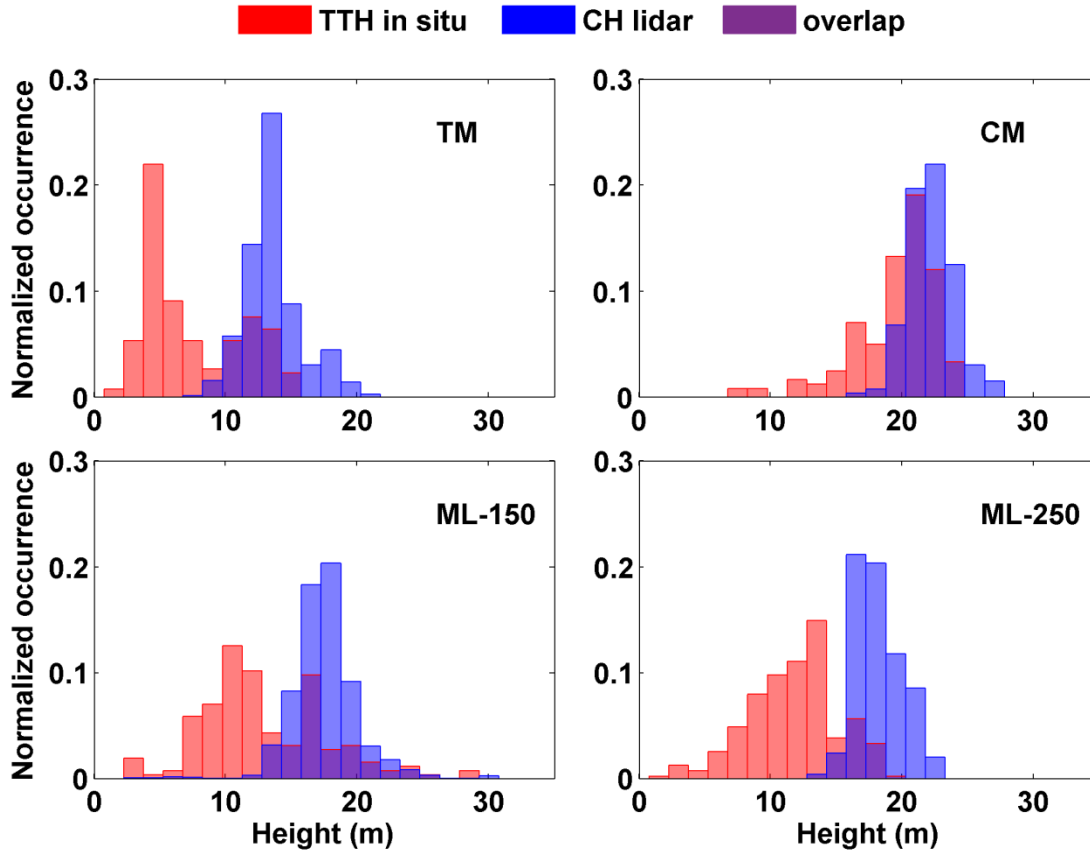


Figure 11. Distributions of the tree top height (TTH) from *in situ* (red) and canopy height (CH) from lidar (blue) measurements for the sub-plots of Tamarind site (TM), the Cryptomeria site (CM), and Mare-Longue tropical rain forest sites at 150 m (ML-150) and 250 m (ML-250) amsl. The overlapping parts are in purple. Uncertainty on retrieved heights is 4 m (1.5 m) for *in situ* (lidar) measurements.

In Figure 10 the Tamarind and Cryptomeria sub-plots are highlighted. We notice that the Tamarind (TM) sub-plot has scarcer vegetation than its surroundings, whereas the Cryptomeria (CM) sub-plot is denser than its surroundings. Images obtained over Mare-Longue and Bélouve (not shown here) present on the contrary a good homogeneity as well as high NDVI (> 0.8), typical of primary tropical forest growing on regular slopes, which is coherent with the results previously discussed in Figure 9.

The uncertainties on the CH derived from the full-waveform airborne lidar ULICE have been assessed to be between 1 and 2 m in previous works (Cuesta et al., 2010; Shang & Chazette, 2014). The uncertainties from ground measurements in a dense tropical forest have been evaluated during the experiment in the order of ± 4 m (several measurements on the same tree with different operators with a dendrometer and a laser telemeter). It is due to the difficulty to identify the tree top among other branch extremities. Note that for BF and ML-500 it was difficult to access the site and almost impossible to identify the top of a tree from neighbors. Consequently, *in situ* measurements have not been considered as valid for these two sites. For the Cryptomeria site (CM) where trees have about the same maturity, the differences between CH derived from lidar and TTH derived from *in situ* measurements are ~ 3 m included in the previous uncertainties. For the others, the discrepancy is larger (> 6 m) as for the TM site.

5.1.3. Understanding results with apparent foliage profiles

The canopy height (CH) does not provide enough resolved information on the vertical structure of the forest systems, which can be very complex because of the presence of multiple layers of coppices, as well as undergrowth (i.e. tree ferns, ferns, bushes). Hence, it is preferable to consider the vertical profile of the apparent foliage (F_{app}). Such profile is corrected from the extinction of the upper canopy. Parker et al. (2001) have shown that F_{app} is an important constraint for energy, water and nutrient flows through forest cover. This is due to the contrasted contributions of the different canopy levels to both photosynthesis and carbon storage (Parker et al., 2001).

As an example, we focus here on two different flight segments obtained on the Bélouve and Tamarind sites. The first site is very dense with continuous vegetation from ground to the canopy (as seen on the field), whereas the second one is likely composed of several distinct internal structures. Figure 12 shows the evolution of the apparent foliage as a function of distance along the transect in the Bélouve area. Two typical vertical profiles are also given. Certain profiles can show pronounced peaks, which identify the precise position of the tree crown or, on the contrary, smoother shapes due to the likely contribution of branches of nearby trees, lianas and, in the lower part of the profile, important undergrowth. Overall, because of the high density of trees in the tropical montane forest of Bélouve, the lidar profiles mainly highlight only one vertical structure with one peak. This is also the case for the Cryptomeria site, but not for the same reason, because it is an exploited plot and there are generally no overlapping trees. On the contrary, for the Tamarind site, which lies on the slope of Piton Maïdo, the convoluted tree trunks and complex development in response to storm winds lead to the existence of two superimposed layers as can be seen in Figure 13. The profiles show there is generally an area with a lower density of vegetation between the two layers (between 4 and 8 m agl), leading to less backscattered signal. This complex structure may be the source of discrepancies between airborne measurements and the *in situ* census made from the ground level. Another interesting and concrete conclusion is that the energy and water vapor fluxes between the forest and the atmosphere are mainly at the crown level of the trees for Tamarinds, even if underground also contributes below ~8 m agl. In contrast, for the Bélouve site, these fluxes are distributed over the whole vertical forest structure.

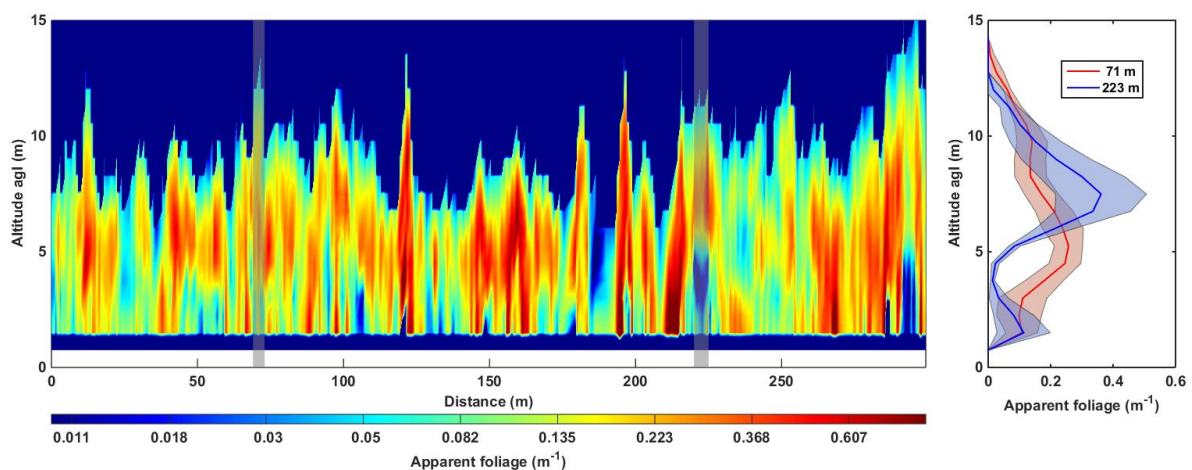


Figure 12. Evolution of the forest vertical profile of the lidar-derived apparent foliage (F_{app}) along a transect of the Bélouve site (BL, left panel). Two specific vertical profiles are shown on the right panel and their locations are highlighted in transparent gray on the left panel.

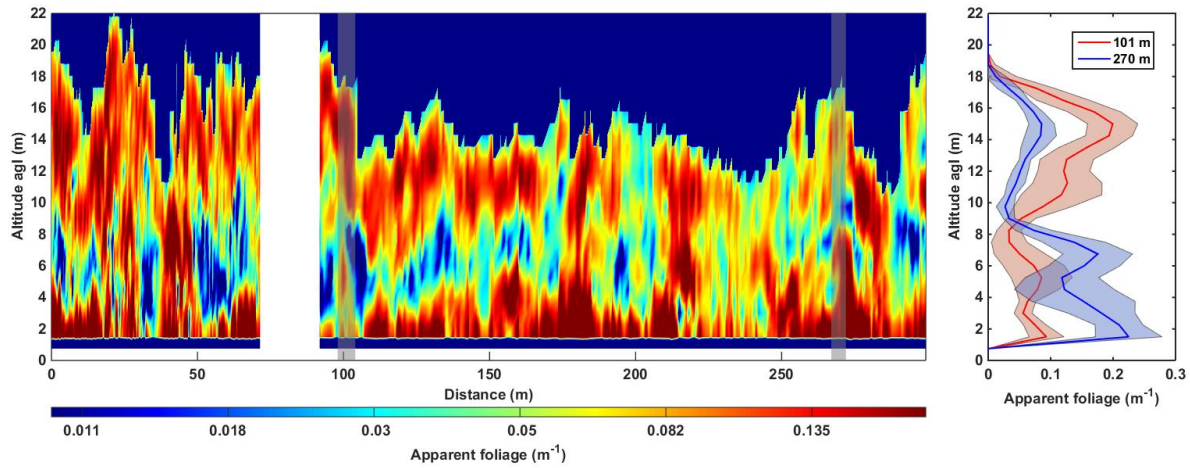


Figure 13. Evolution of the forest vertical profile of the lidar-derived apparent foliage (F_{app}) along a transect of the Tamarind site (TM, left panel). Two specific vertical profiles are given on the right panel and their locations are highlighted in transparent gray on the left panel.

5.2. Leaf area index

LAI is also a key parameter linked to the plant respiration and photosynthesis, as explained by Gower and Norman (1991). Consequently, it is related to the above ground biomass (Ellsworth & Reich, 1993). Such a parameter is also a strong constraint for forest ecosystems modelling. It characterizes the forest interaction surface and exchange efficiency with the atmosphere.

5.2.1. Lidar-derived LAI

The LAI has been retrieved from each individual lidar profile to complement the characterization of the sampled forest sites. The mean LAI (\overline{LAI}) ranges from about 3.5 to 7.8 m^2/m^2 for sampled forest sites. The standard deviation is between 2.5 and 3.9 m^2/m^2 not necessarily correlated with the one of CH (Table 3).

Regarding the average values and variability of both CH and \overline{LAI} , the 7 sites are shared in 2 distinct groups (Figure 14): the endemic forests and the planted/exotic forests, including the coastal site (CT). The higher \overline{LAI} are for the 3 Mare-Longue sites; the largest value is found on ML-150. The site of Bélouve (BF) with $\overline{LAI} = 5.1$ appears to be isolated from the others endemic forest sites ($\overline{LAI} = 7.8$ for ML-150). Indeed, although the Mare-Longue and Bélouve sites shelter the densest and most native tropical forests of the island, they are located at very different altitudes. The Bélouve forest is characterized by a soil composed of little mineralized organic material, as limited by the temperature conditions. This can contribute to a limitation of nutriment supplies as shown by Tanner et al. (1998) for tropical mountain rain forests of Hawaii, Costa Rica and Colombia, which grows mainly on a lava substrate. The previous coarse separation of forest biomes confirms the work of Strasberg et al. (2005).

As an example, the histogram of LAI derived from the lidar for the Bélouve site is also presented Figure 15. The LAI value varies much for the same site from a point to another, likely due to very important difference in terms of plant nutriment in the ground.

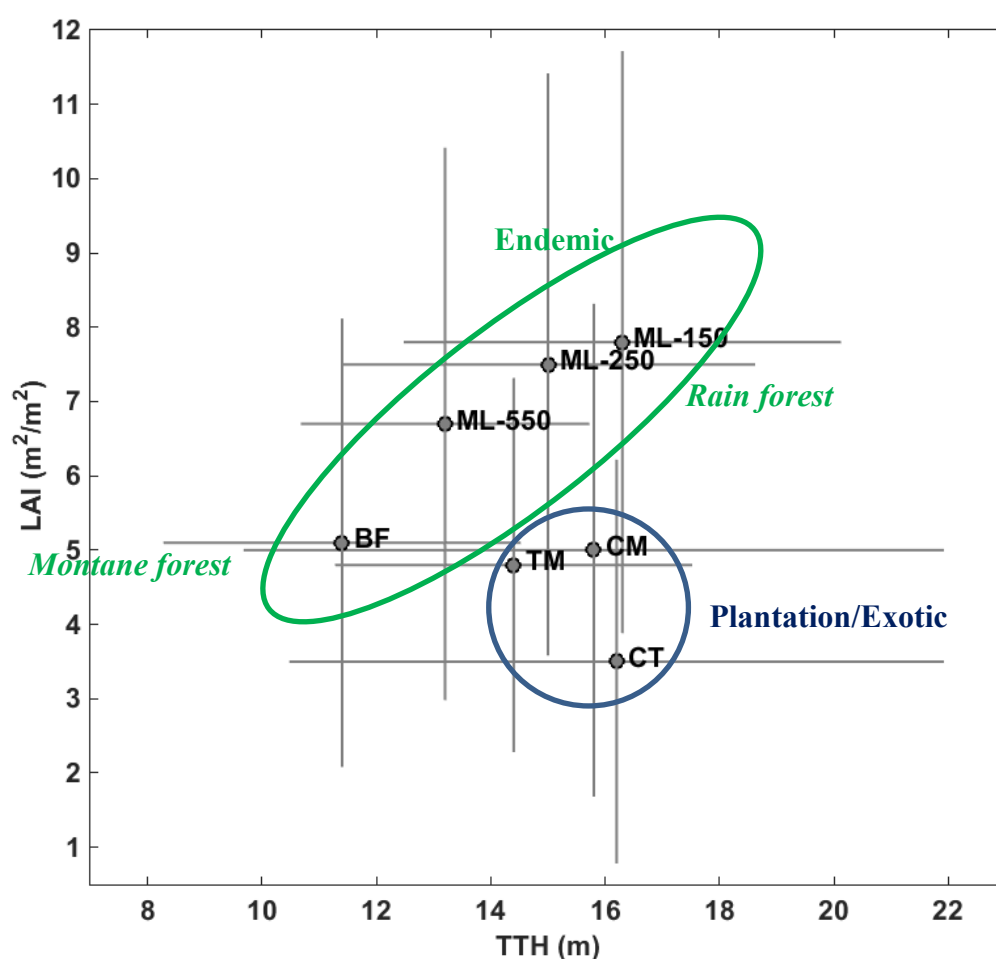


Figure 14. Mean (dot) and standard deviations (line segments) of forest lidar-derived leaf area index (LAI) against the canopy height (CH) for the 7 sites: coastal (CT), Tamarind (TM), Cryptomeria (CM), Bélouve (BF), and Mare-Longue (ML-150, 250 and 550) sites. Measurements with CH < 5 m are not considered.

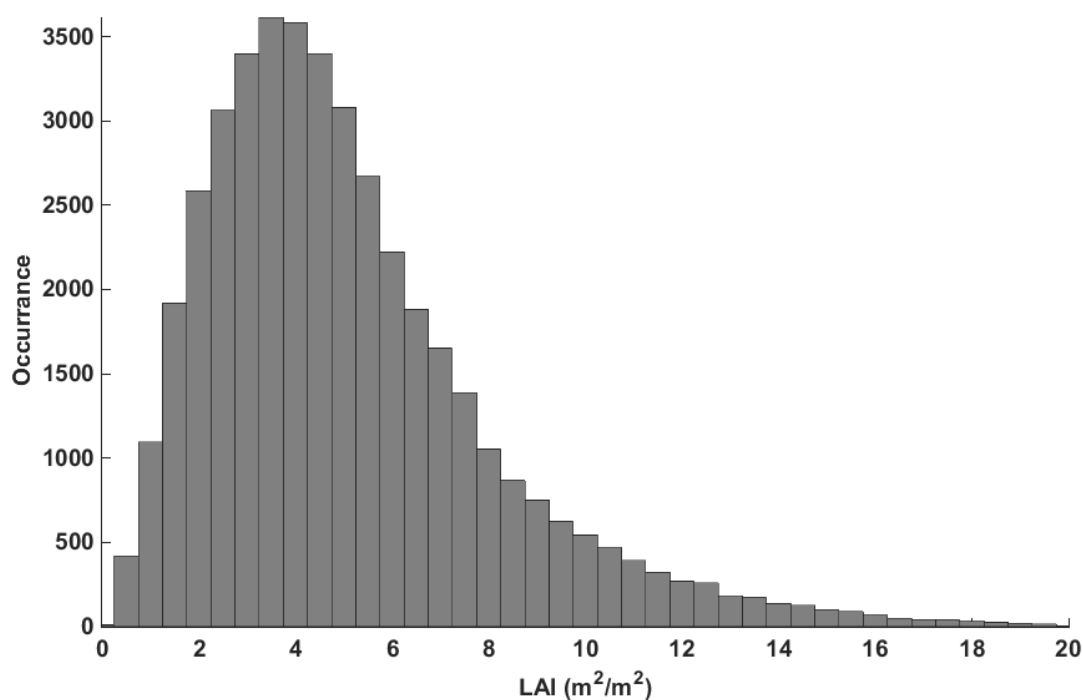


Figure 15. Histogram of the leaf area index (LAI) derived from the airborne lidar for the tropical mountain rain forests of Bélouve.

5.2.2. Validation and discussion

The lidar-derived LAI values are in the range of usual values. Mature evergreen tropical forests usually have large LAI, more than $4 \text{ m}^2/\text{m}^2$ as shown for examples in Doughty and Goulden (2008) using monthly MODIS observations over tropical forests of Brazil. Cristiano et al. (2014) also found mean LAI to be larger than $7 \text{ m}^2/\text{m}^2$ for native subtropical forests of Argentina, Brazil and Paraguay. Moreover, the mean LAI derived from our lidar measurements are within the range of values deduced from the lidar- or tower-derived cumulative LAI of Tang et al. (2012), which give LAI between 5 and $9 \text{ m}^2/\text{m}^2$ for secondary and old-growth forests. Asner et al. (2003) performed a global synthesis of LAI from various ecological and remote sensing studies. The mountain tropical forest of Bélouve, the Tamarind and the Cryptomeria sites are associated with mean LAI very close to the one compiled by these authors, which found for tropical deciduous and evergreen broadleaves LAI between 3.9 and $4.8 \text{ m}^2/\text{m}^2$ on 78 samplings, with a maximal value close to $9 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Our standard deviations are in the same range as obtained by Asner et al. (2003) which give values from 0.7 to $4.3 \text{ m}^2/\text{m}^2$.

In Table 4, the mean LAI derived from MODIS onboard Terra and Aqua are also given. These values are established for pixels of $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ corresponding to the land level 3 product (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>) (e.g. Yang et al., 2006). It is a synthesis on 8 days, and we considered the data collected from May to August 2014. The LAI were selected by retaining only those above the average to avoid residual cloud contaminations often present close to the reliefs. The comparison with our observations was possible only on the large sampled areas due to the low spatial resolution of MODIS. The agreement is very good on Bélouve and sites situated on the foothills of the Piton Mado (TM and CM, $\sim 5 \text{ m}^2/\text{m}^2$). Lidar-derived mean LAIs for ML-150, -250 and -550 (7.8 , 7.5 and $6.7 \text{ m}^2/\text{m}^2$, respectively) present higher differences with MODIS-derived LAI ($5.9 \text{ m}^2/\text{m}^2$). As previously explained, it is difficult to conclude for both ML-250 and ML-550 because the horizontal sampling may not be significant enough.

The soundness of the LAI values retrieved locally by the lidar was expected to be assessed using the ADC-air camera from NDVI. Indeed, NDVI also yields LAI estimates according to model relationships extracted for remote sensing on various forests globally. In Figure 16 the results in terms of NDVI versus LAI found from the airborne lidar and the ADC-air camera are given in comparison to relationships derived for tropical forest as measured *in situ* in Costa Rica (Kalácska et al., 2004), broadleaf forest as measured *in situ* in California (Gamon et al., 1995), and broadleaf forest as extracted globally from MODIS data (Knyazikhin et al., 1999). We notice immediately that the lidar-retrieved LAI values place our data points close to the saturation zone of the relationship, limiting the interest of this comparison for validation purposes. We are indeed dealing with thick forest with intense photosynthesis. Another observation is the large dispersion of the different proposed relationships. Nevertheless, we see that the LAI values found from lidar profiles are broadly confirmed given the NDVI observed on the sites. As expected, a positive correlation of NDVI with LAI is found. While staying in the spectrum of previously seen values, the Tamarind site stands out in the lower range of NDVI (only 0.64) pointing towards a specificity of this type of forest. Note that two sites were omitted (CT and ML-250) because they were not imaged by the camera.

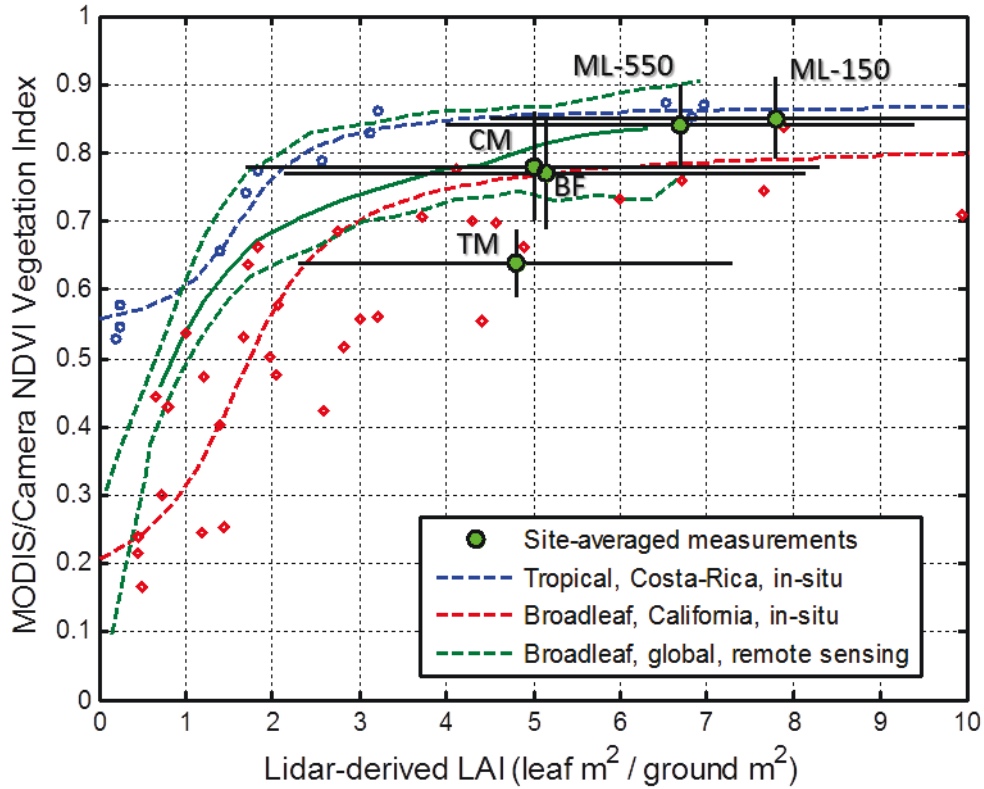


Figure 16. NDVI (obtained from ADC-air camera and MODIS NDVI product) as a function of lidar-derived LAI (green circles). Similar relationships are also given for tropical forest as measured in situ in Costa Rica (blue with data points, Kalácska et al., 2004); for broadleaf forest as measured in situ in California (red with data points, Gamon et al., 1995); for broadleaf forest as extracted globally from MODIS data (green, Knyazikhin et al., 1999), including the overall dispersion in green dashed lines. Lidar LAI and MODIS/camera NDVI dispersions on the forest plots are represented by black bars.

6. Conclusion

Airborne lidar measurements conducted in May 2014 over several tropical forest sites of Réunion Island allow to clearly identify the different types of coverage thanks to key parameters derived from airborne lidar measurements: the canopy height (CH), the forest leaf area index (LAI) and the vertical profiles the apparent foliage (F_{app}).

Lidar-derived CH histograms have been compared to the tree trop height (TTH) measured during in situ censuses. Understandably, for *in situ* measurements the sampling areas were reduced ($\sim 40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$), but the sub-plots were chosen so as to be as representative as possible of the extended sites. The CH and TTH statistical values (mean, median, maximal values, and standard deviation (std)) are shown to be in agreement for the Cryptomeria site. The discrepancies for the other sites are mainly due to the presence of underlying trees masked when only using the CH parameter. This ambiguity is shown to be resolved when considering the apparent foliage profile.

We also derived the leaf area index (LAI) from the lidar vertical profiles. The tropical rain forests of Réunion Island (ML-150) have been also shown to be associated with the higher mean LAI of $7.8 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Such a value contrasts with the one retrieved for the tropical montane cloud forest of Bélouze, which is shown to be $\sim 5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ in average. This difference may be explained in term of plant nutriment supply between these two forest categories (Knyazikhin et al., 1999). The lidar- and MODIS-derived LAI are shown to be in good agreement, except for the higher values retrieved for the

Mare-Longue sites, around which the forest area is small compared to the MODIS horizontal resolution of $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$. We have also shown that the simultaneous use of lidar-derived CH and LAI is sufficient to coarsely classify forests of La Réunion Island. The endemic and exotic forests are well distinguished when considering these two ecological parameters.

Finally, this study is an opportunity to compose an original and diverse lidar data base that will help further works on remote sensing of tropical forests, and complement more intensive studies such as the one performed by Tang et al. (2012). In particular, it may be an important reference in the anticipation of a spaceborne mission dedicated to global forest surveys, with the scientific objectives of evaluating the biospheric carbon stock and helping the sustainable management of forests in order to preserve biodiversity.

Acknowledgment

The experiments have been funded by the Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), the Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA), and the Université de la Réunion through the federation Observatoire des Milieux Naturels et des Changements Globaux (OMNCG) of the Observatoire des Sciences de l'Univers de la Réunion (OSU-R). We are also grateful for the support offered by the Direction Générale de l'Armement (DGA). We thank Jean-Cyrille Notter (Parc National de la Réunion) for the provided DTM (digital terrain model). We also thank F. Maignan (LSCE), C. Bacour (LSCE) and G. Dedieu (CESBio) for useful discussion, and F. Toussaint for planning and performing the ULA flights.

Appendix A: Lidar improvements and technical characteristics

For this experiment over dense tropical forest, a challenge was to obtain a large and tunable sounding area on the ground ($\sim 10 \text{ m}$ diameter) compared to the overall span of dominant trees, in the hope that ground echoes could be perceived from the optically thinner areas between the trees at each laser shot. This can be done with a divergent beam and large field of view. Nevertheless, in order to reduce turbulence effect due to island topography and to get a better identification of sites from the ULA, the flight altitude was chosen to be few hundred meters (300 to 350 m). Hence, the laser divergence needs to reach several tens of milliradians, an order of magnitude seldom seen in lidar. Two reasons for that are the limited angular acceptancy of interference filters and the need to reduce background light. The usual field of view of ULICE is actually 2 mrad.

The ULICE system was thus modified as follows. The divergence budget of the lidar can be tracked on Figure A1. It is projected on the horizontal plane; divergence is $\sim 25\%$ lower in the vertical plane due to an elliptical laser beam profile.

On the emitter side, a motorized beam expander (Motex by Altechna) with a fix $\times 12$ magnification and tunable divergence was introduced. A small $\times 1.5$ pre-expander with replaceable high quality lenses was inserted to protect it from the full irradiance of the concentrated laser beam (only $2.2 \text{ mm} \times 1.7 \text{ mm}$ size at $1/e^2$), and a divergent lens was added at the output to shift the accessible divergence range from $-20 \Rightarrow +20 \text{ mrad}$ to $0 \Rightarrow +40 \text{ mrad}$ (seen on Figure A1). The output beam size of $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \pm 10\%$ at $1/e^2$, allows for little truncation and fulfills eye safety conditions for every chosen divergence value. However, special care has to be taken for optical alignment and stability, as any mechanical constraints are quick to send the beam out of axis, given the high magnification power.

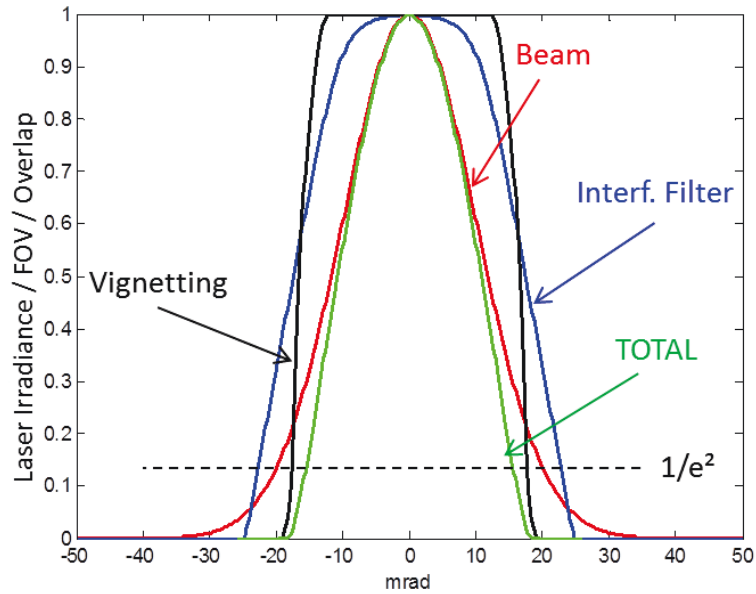


Figure A1. Divergence profile of the laser beam (beam, red), angular acceptance profile of the receiver components (IF, blue and vignetting, black), and their overlap (green), giving an expected sounding divergence at $1/e^2$ of 31 mrad.

On the receiver side, after removing any field stop, large bandwidth interference filters (10 nm bandwidth) centered at 355 nm have replaced the previous narrower filters (0.3 nm bandwidth) with only 3 mrad angular acceptance. The angular acceptance of the new filters was measured around 38 mrad FWHM (full width at half maximum), as seen on Figure A1. Another difficulty to be expected with an optical system designed for a narrow field of view is vignetting. As the full-light field was only limited to 6 mrad on ULICE, the optical path had to be compacted by a factor of 3. Channel #0 should thus experience limited vignetting (24 mrad full-light field); however, due to the beam splitting, longer channel #1 should have more vignetting (16 mrad full-light field). Overall, the overlap between the expected profiles of the laser beam footprint and lidar field of view yields a theoretical sounding divergence of 31 mrad at $1/e^2$, suitable for a 10 m-wide lidar footprint from a 330 m (1000 feet) flight altitude, as shown on Figure A1.

The actual sounding divergence of the system in the horizontal plane was experimentally evaluated on a flat wall at 30 m range, using a cache mounted on a micrometer stage that gradually occulted the primary focal plane of the system. The derivative of collected energy versus occulted field gives the profile of the sounding area, albeit rather noisy because of differentiation. As presented on Figure A2 (a) for channel #0 without the beam splitter, the measured profile agrees well with the expected profile from Figure A1. Error bars represent the standard deviation over 6 consecutive measurements, mostly due to detection noise.

The beam splitter (Broadband Polka-dot beamsplitter by Melles-Griot) was only introduced in a second step, so as to determine the impact of its large mirror dot pattern that allows beam-splitting with little polarization or diffraction effects, but not without possible transmittance variations in the field of view. The comparison between Figure A2 (a) and (b) shows that the impact of the beam splitter is minimal on channel #0 (the changes between +5 and -5 mrad are caused by the variable sunlight conditions between both experiments). On channel #1, the left part of the profile is trimmed by vignetting as expected, but the right part follows the slow fall of channel #0. As the measurement is perturbed by strong fluctuations of background light, we cannot conclude further than estimating the sounding divergence on channel #1 is below 22 mrad. Unfortunately, this long characterization could not be performed a second time in the same conditions as the experimental campaign.

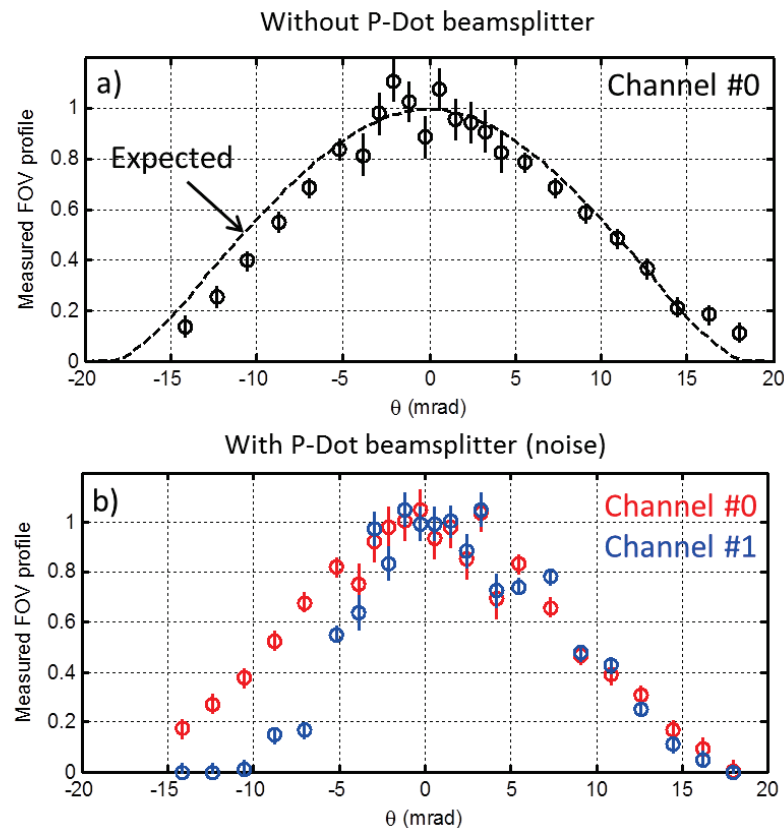


Figure A2. Measured sounding profile as given by the derivative of collected energy versus occultation of the lidar focal plane, without (a) and with (b) the “Polka-dot” beam-splitter used for the two-channel configuration. Error bars represent standard deviations over 6 consecutive measurements. Sunlight fluctuations explain the irregular measurements on graph (b).

References

- Ahmed, R., Siqueira, P., & Hensley, S. (2013). A study of forest biomass estimates from lidar in the northern temperate forests of New England. *Remote Sensing of Environment*, 130, 121–135. doi:10.1016/j.rse.2012.11.015
- Asner, G. P., Scurlock, J. M. O., & A. Hicke, J. (2003). Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography*, 12(3), 191–205. doi:10.1046/j.1466-822X.2003.00026.x
- Ballhorn, U., Jubanski, J., & Siegert, F. (2011). ICESat/GLAS Data as a Measurement Tool for Peatland Topography and Peat Swamp Forest Biomass in Kalimantan, Indonesia. *Remote Sensing*, 3(12), 1957–1982. doi:10.3390/rs3091957
- Balzter, H., Rowland, C. S., & Saich, P. (2007). Forest canopy height and carbon estimation at Monks Wood National Nature Reserve, UK, using dual-wavelength SAR interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 108(3), 224–239.
- Beets, P. N., Reutebuch, S., Kimberley, M. O., Oliver, G. R., Pearce, S. H., & McGaughey, R. J. (2011). Leaf Area Index, Biomass Carbon and Growth Rate of Radiata Pine Genetic Types and Relationships with LiDAR. *Forests*, 2(4), 637–659. doi:10.3390/f2030637
- Black, T. A., Hartog, G., NEUMANN, H. H., BLANKEN, P. D., YANG, P. C., RUSSELL, C., ... NOVAK, M. D. (1996). Annual cycles of water vapour and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest. *Global Change Biology*, 2(3), 219–229. doi:10.1111/j.1365-2486.1996.tb00074.x

- Blair, J. B., Rabine, D. L., & Hofton, M. A. (1999). The Laser Vegetation Imaging Sensor: A medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3), 115–122.
- Brown, M. J., & Parker, G. G. (1994). Canopy light transmittance in a chronosequence of mixed-species deciduous forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 24(8), 1694–1703. doi:10.1139/x94-219
- Cadet, T., & Figier, J. (1989). *Réserve naturelle de Mare-Longue : étude floristique et écologique* (p. 48). Retrieved from http://etic.univ-reunion.fr/theresien/docs/publications/16_Cadet_Figier.pdf
- Chazette, P., Bocquet, M., Royer, P., Winiarek, V., Raut, J.-C., Labazuy, P., ... Cariou, J.-P. (2012a). Eyjafjallajökull ash concentrations derived from both lidar and modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D20), n/a–n/a. doi:10.1029/2011JD015755
- Chazette, P., Dabas, A., Sanak, J., Lardier, M., & Royer, P. (2012b). French airborne lidar measurements for Eyjafjallajökull ash plume survey. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(15), 7059–7072.
- Chazette, P., David, C., Lefrère, J., Godin, S., Pelon, J., & Mégie, G. (1995). Comparative lidar study of the optical, geometrical, and dynamical properties of stratospheric post-volcanic aerosols, following the eruptions of El Chichon and Mount Pinatubo. *Journal of Geophysical Research*, 100(D11), 23195. doi:10.1029/95JD02268
- Chazette, P., Pelon, J., & Mégie, G. (2001). Determination by spaceborne backscatter lidar of the structural parameters of atmospheric scattering layers. *Applied Optics*, 40(21), 3428–40.
- Chen, J. M., Rich, P. M., Gower, S. T., Norman, J. M., & Plummer, S. (1997). Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research*, 102(D24), 29429. doi:10.1029/97JD01107
- Coomes, D. A., Flores, O., Holdaway, R., Jucker, T., Lines, E. R., & Vanderwel, M. C. (2014). Wood production response to climate change will depend critically on forest composition and structure. *Global Change Biology*. doi:10.1111/gcb.12622
- Cristiano, P., Madanes, N., Campanello, P., di Francescantonio, D., Rodríguez, S., Zhang, Y.-J., ... Goldstein, G. (2014). High NDVI and Potential Canopy Photosynthesis of South American Subtropical Forests despite Seasonal Changes in Leaf Area Index and Air Temperature. *Forests*, 5(2), 287–308. doi:10.3390/f5020287
- Cuesta, J., Chazette, P., Allouis, T., Flamant, P. H., Durrieu, S., Sanak, J., ... Flamant, C. (2010). Observing the Forest Canopy with a New Ultra-Violet Compact Airborne Lidar. *Sensors*, 10(8), 7386–7403. doi:10.3390/s100807386
- Doughty, C. E., & Goulden, M. L. (2008). Seasonal patterns of tropical forest leaf area index and CO₂ exchange. *Journal of Geophysical Research*, 113, G00B06. doi:10.1029/2007JG000590
- Ellsworth, D. S., & Reich, P. B. (1993). Canopy structure and vertical patterns of photosynthesis and related leaf traits in a deciduous forest. *Oecologia*, 96(2), 169–178. doi:10.1007/BF00317729
- Etteieb, S., Louhaichi, M., Kalaitzidis, C., & Gitas, I. Z. (2012). Mediterranean forest mapping using hyper-spectral satellite imagery. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(12), 5017–5032. doi:10.1007/s12517-012-0748-6
- Farid, A., Goodrich, D. C., Bryant, R., & Sorooshian, S. (2008). Using airborne lidar to predict Leaf Area Index in cottonwood trees and refine riparian water-use estimates. *Journal of Arid Environments*, 72(1), 1–15. doi:10.1016/j.jaridenv.2007.04.010
- Franklin, S. E., Hall, R. J., Moskal, L. M., Maudie, A. J., & Lavigne, M. B. (2000). Incorporating texture into classification of forest species composition from airborne multispectral images. *International Journal of Remote Sensing*, 21(1), 61–79. doi:10.1080/014311600210993
- Gamon, J. A., Field, C. B., Goulden, M. L., Griffin, K. L., Hartley, A. E., Joel, G., ... Valentini, R. (1995). Relationships Between NDVI, Canopy Structure, and Photosynthesis in Three Californian Vegetation Types. *Ecological Applications*, 5(1), 28. doi:10.2307/1942049

- Garestier, F., Dubois-Fernandez, P. C., & Champion, I. (2008). Forest Height Inversion Using High-Resolution P-Band Pol-InSAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(11). doi:10.1109/TGRS.2008.922032
- Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. O., & Foley, J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2(4), 045023. doi:10.1088/1748-9326/2/4/045023
- Gower, S. T., & Norman, J. M. (1991). Rapid Estimation of Leaf Area Index in Conifer and Broad-Leaf Plantations. *Ecology*, 72(5), 1896. doi:10.2307/1940988
- Greco, S., & Baldocchi, D. D. (1996). Seasonal variations of CO₂ and water vapour exchange rates over a temperate deciduous forest. *Global Change Biology*, 2(3), 183–197. doi:10.1111/j.1365-2486.1996.tb00071.x
- Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P. I., & Geron, C. (2006). Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(11), 3181–3210. doi:10.5194/acp-6-3181-2006
- Hayashi, M., Saigusa, N., Oguma, H., & Yamagata, Y. (2013). Forest canopy height estimation using ICESat/GLAS data and error factor analysis in Hokkaido, Japan. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 81, 12–18.
- He, L., Chen, J. M., Pisek, J., Schaaf, C. B., & Strahler, A. H. (2012). Global clumping index map derived from the MODIS BRDF product. *Remote Sensing of Environment*, 119, 118–130. doi:10.1016/j.rse.2011.12.008
- Hilton, F., Armante, R., August, T., Barnet, C., Bouchard, A., Camy-Peyret, C., ... Zhou, D. (2012). Hyperspectral Earth Observation from IASI: Five Years of Accomplishments. *Bulletin of the American Meteorological Society*.
- Hollinger, D. Y. (1989). Canopy Organization and Foliage Photosynthetic Capacity in a Broad-Leaved Evergreen Montane Forest. *Functional Ecology*, 3(1), 53–62. doi:10.2307/2389675
- Horn, H. S. (1971). *The Adaptive Geometry of Trees* (Vol. 1971, p. 144). Princeton University Press.
- Huesca, M., MERINO-DE-MIGUEL, S., GONZALEZ-ALONSO, F., MARTINEZ, S., MIGUEL CUEVAS, J., & CALLE, A. (2013). Using AHS hyper-spectral images to study forest vegetation recovery after a fire. *International Journal of Remote Sensing*, 34(11-12), 4025–4048. Retrieved from <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=27302333>
- Hyde, P., Dubayah, R., Walker, W., Blair, J. B., Hofton, M., & Hunsaker, C. (2006). Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy. *Remote Sensing of Environment*, 102(1-2), 63–73.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. *Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Kalácska, M., Sánchez-Azofeifa, G. ., Rivard, B., Calvo-Alvarado, J. ., Journet, A. R. ., Arroyo-Mora, J. ., & Ortiz-Ortiz, D. (2004). Leaf area index measurements in a tropical moist forest: A case study from Costa Rica. *Remote Sensing of Environment*, 91(2), 134–152. doi:10.1016/j.rse.2004.02.011
- Karl, T., Harley, P., Emmons, L., Thornton, B., Guenther, A., Basu, C., ... Jardine, K. (2010). Efficient atmospheric cleansing of oxidized organic trace gases by vegetation. *Science (New York, N.Y.)*, 330(6005), 816–9. doi:10.1126/science.1192534
- Knyazikhin, Y., Glassy, J., Privette, J. L., Tian, Y., Lotsch, A., Zhang, Y., ... Running, S. W. (1999). *MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15) Algorithm Theoretical Basis Document* (pp. 1–130).
- Lathière, J., Hauglustaine, D. A., De Noblet-Ducoudré, N., Krinner, G., & Folberth, G. A. (2005). Past and future changes in biogenic volatile organic compound emissions simulated with a global dynamic vegetation model. *Geophysical Research Letters*, 32(20), 1–4.

- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Acker, S. A., Parker, G. G., Spies, T. A., & Harding, D. (1999a). Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests. *Remote Sensing of Environment*, 70(3), 339–361.
- Lefsky, M. A., Harding, D., Cohen, W. B., Parker, G., & Shugart, H. H. (1999b). Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of Environment*, 67(1), 83–98.
- Leroy, M., Deuzé, J. L., Bréon, F. M., Hautecoeur, O., Herman, M., Buriez, J. C., ... Roujean, J. L. (1997). Retrieval of atmospheric properties and surface bidirectional reflectances over land from POLDER/ADEOS. *Journal of Geophysical Research*, 102(D14), 17023. doi:10.1029/96JD02662
- Measures, R. M. (1984). *Laser remote sensing: fundamentals and applications*. (J. Wiley, Ed.) (p. 510). Krieger publishing company.
- Ni-Meister, W., Jupp, D. L. B., & Dubayah, R. (2001). Modeling lidar waveforms in heterogeneous and discrete canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(9), 1943–1958. doi:10.1109/36.951085
- Parker, G. G., Lefsky, M. A., & Harding, D. J. (2001). Light transmittance in forest canopies determined using airborne laser altimetry and in-canopy quantum measurements. *Remote Sensing of Environment*, 76(3), 298–309. doi:10.1016/S0034-4257(00)00211-X
- Popescu, S. C., Wynne, R. H., & Scrivani, J. A. (2001). Fusion of Small-Footprint Lidar and Multispectral Data to Estimate Plot- Level Volume and Biomass in Deciduous and Pine Forests in Virginia, USA. *Society of American Foresters*, 50(4), 551–565. Retrieved from <http://www.ingentaconnect.com/content/saf/fs/2004/00000050/00000004/art00013>
- Riaño, D., Valladares, F., Condés, S., & Chuvieco, E. (2004). Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (Lidar) in two contrasting forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(3-4), 269–275. doi:10.1016/j.agrformet.2004.02.005
- Schutz, B. E., Zwally, H. J., Shuman, C. A., Hancock, D., & DiMarzio, J. P. (2005). Overview of the ICESat Mission. *Geophysical Research Letters*, 32(21). doi:10.1029/2005GL024009
- Shang, X., & Chazette, P. (2014). Interest of a Full-Waveform Flown UV Lidar to Derive Forest Vertical Structures and Aboveground Carbon. *Forests*, 5(6), 1454–1480.
- Shang, X., & Chazette, P. (2015). End-to-End Simulation for a Forest-Dedicated Full-Waveform Lidar onboard a Satellite Initialized from UV Airborne Lidar Experiments. *Submitted to Remote Sensing*.
- Simard, M., Pinto, N., Fisher, J. B., & Baccini, A. (2011). Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar. *Journal of Geophysical Research*. doi:10.1029/2011JG001708
- Solberg, S., Brunner, A., Hanssen, K. H., Lange, H., Næsset, E., Rautiainen, M., & Stenberg, P. (2009). Mapping LAI in a Norway spruce forest using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 113(11), 2317–2327. doi:10.1016/j.rse.2009.06.010
- Strasberg, D. (1996). Diversity, size composition and spatial aggregation among trees on a 1-ha rain forest plot at La Réunion. *Biodiversity and Conservation*, 5(7), 825–840. doi:10.1007/BF00054737
- Strasberg, D., Rouget, M., Richardson, D. M., Baret, S., Dupont, J., & Cowling, R. M. (2005). An Assessment of Habitat Diversity and Transformation on La Réunion Island (Mascarene Islands, Indian Ocean) as a Basis for Identifying Broad-scale Conservation Priorities. *Biodiversity and Conservation*, 14(12), 3015–3032. doi:10.1007/s10531-004-0258-2
- Tang, H., Brolly, M., Zhao, F., Strahler, A. H., Schaaf, C. L., Ganguly, S., ... Dubayah, R. (2014). Deriving and validating Leaf Area Index (LAI) at multiple spatial scales through lidar remote sensing: A case study in Sierra National Forest, CA. *Remote Sensing of Environment*, 143, 131–141.

- Tang, H., Dubayah, R., Swatantran, A., Hofton, M., Sheldon, S., Clark, D. B., & Blair, B. (2012). Retrieval of vertical LAI profiles over tropical rain forests using waveform lidar at La Selva, Costa Rica. *Remote Sensing of Environment*, 124, 242–250. doi:10.1016/j.rse.2012.05.005
- Tanner, E. V. J., Vitousek, P. M., & Cuevas, E. (1998). Experimental Investigation Of Nutrient Limitation Of Forest Growth On Wet Tropical Mountains. *Ecology*, 79(1), 10–22. doi:10.1890/0012-9658(1998)079[0010:EIONLO]2.0.CO;2
- Toan, T., Quegan, S., Woodward, I., Lomas, M., Delbart, N., & Picard, G. (2004). Relating Radar Remote Sensing of Biomass to Modelling of Forest Carbon Budgets. *Climatic Change*, 67(2-3), 379–402. doi:10.1007/s10584-004-3155-5
- Tsigaridis, K., & Kanakidou, M. (2003). Global modelling of secondary organic aerosol in the troposphere: a sensitivity analysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3(5), 1849–1869. doi:10.5194/acp-3-1849-2003
- Wagner, W., Hollaus, M., Briese, C., & Ducic, V. (2008). 3D vegetation mapping using small-footprint full-waveform airborne laser scanners. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5), 1433–1452. doi:10.1080/01431160701736398
- Yang, W., Tan, B., Huang, D., Rautiainen, M., Shabanov, N. V., Wang, Y., ... Myneni, R. B. (2006). MODIS leaf area index products: from validation to algorithm improvement. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(7), 1885–1898. doi:10.1109/TGRS.2006.871215

4.3. Conclusion

Cette expérience et les résultats associés ont parfaitement répondu aux objectifs scientifiques que nous avons affichés dans le cadre du programme DELICE. J'ai pu confirmer mes précédents calculs effectués pour définir la tâche laser au sol optimale. En effet, d'un point de vue expérimental, et sur des forêts tropicales, la tâche laser la mieux adaptée doit être supérieure à 10 m. Nous n'avons pas observé de grosses différence pour des mesures lidar aéroportées utilisant une tâche au sol d'environ 20 m.

Hors de ces considérations techniques, nous avons pu constater que la mesure lidar seule pouvait déjà apporter des informations quantitatives afin d'aider à la classification statistique de sites forestiers. Comparativement aux observations au sol, qui ont nécessité près d'un mois de travail pour une moyenne de 4 personnes, les mesures lidar ont très bien restituées les hauteurs d'arbres et les dispersions associées. La limitation est surtout liée à la présence de taillis qui va être plus ou moins forte en fonction des sites. En cela le site des Tamarins est le plus critique. Dans une telle situation, la considération du profil lidar d'extinction dans la structure de la canopée, plutôt que du seul paramètre intégré qu'est l'épaisseur optique, permet de lever une bonne partie des indéterminations. La difficulté est qu'il faudrait alors appliquer l'algorithme utilisant les ajustements de gaussiennes afin de bien localiser les différentes sous-couches. C'est un algorithme un peu plus lourd en termes de temps de calcul mais qui pourra, à termes, être optimisé.

Un résultat également très intéressant a été sur la capacité du lidar à échantillonner une forêt tropicale sauvage comme celle de Bélouve. Cette forêt très difficilement accessible à pieds peut donc être maintenant caractérisée d'un point de vue structurel grâce à la mesure lidar aéroportée. C'est un phénomène naturel lié au cycle de vie des forêts naturelle qui permet d'accéder plus facilement aux échos de sol. Les trouées ou « chablis » générés par la chute des arbres en fin de vie ouvrent un accès vers la surface en de nombreux points de mesure comme cela a été montré par le nombre de mesures disponibles dans le paragraphe précédent. On a également noté que l'on pouvait « relâcher » les contraintes sur l'échantillonnage horizontal pour ce type de forêts tropicales, ce qui conduit à valoriser les observations à grande échelle à partir de l'espace.

Ce travail de recherche conduit à la fin de ma thèse va néanmoins être pris en compte afin d'effectuer le bilan de liaison pour un système lidar embarqué sur plateforme spatiale. Cette modélisation va être présentée dans le chapitre suivant.

5

Simulation du signal lidar pour l'étude des forêts à l'échelle globale

5.1. Introduction

Les données qui ont été acquises pendant les expériences lidar aéroporté présentées dans les chapitres précédents, c'est-à-dire sur les forêts de moyenne latitude (chapitre 3) et les forêts tropicales (chapitre 4), ont permis de constituer une base de données de référence de profils lidar. Cette base de données est un outil scientifique original et très efficace pour la validation, mais également l'initialisation, nécessaires au développement d'un démonstrateur lidar spatial performant. Le simulateur numérique est également appelé dans cette thèse un modèle « end-to-end » car il associe la méthode directe de calcul des profils lidar théoriques, et la méthode inverse de restitution d'estimateurs des paramètres caractéristiques recherchés pour la forêt. Le principe du simulateur a bien été décrit dans le chapitre 2. En utilisant une approche de Monte Carlo, le simulateur que j'ai développé permet d'évaluer les incertitudes associées à chaque paramètre critique pour un système lidar embarqué sur un avion ou une plateforme spatiale. De telles évaluations sont peu effectuées et discutées dans la littérature scientifique comme souligné par Zolkos *et al.* (2013). C'est pourtant un prérequis avant d'envisager une mission spatiale. L'ensemble de ce travail est décrit en détail dans une publication à comité de lecture soumise. Elle constituera la partie 5.2 de ce chapitre.

Dans cette partie sont présentés les bilans de liaison (« link budget » en anglais) qui ont été réalisés pour un système lidar 355 nm aéroporté, et pour un système lidar à 355 et 1064 nm embarqué sur plateforme spatiale dédiés aux études des forêts aux échelles régionale à globale. Ces résultats novateurs permettent d'obtenir une première estimation de l'intérêt d'un lidar spatial via le développement du simulateur.

Parmi les paramètres critiques qui seront discutés pour le système lidar, l'empreinte du laser au sol doit être préalablement bien évaluée car elle va définir le niveau de pénétration du faisceau laser dans la structure forestière, et donc la probabilité d'atteindre la surface sous la forêt. Cet aspect a déjà été présenté lors de l'étude sur la forêt de Fontainebleau (chapitre 3, section 3.2.3), il sera repris ici. Un autre paramètre fondamental, c'est le rapport signal sur bruit (« signal to noise ratio » (SNR) en anglais). C'est à partir de sa valeur que l'on va définir le niveau de précision obtenu sur les paramètres forestiers. Nous verrons que le rapport signal sur bruit minimum a été évalué pour chaque paramètre forestier recherché. Mais ce SNR est modulé par l'empreinte au sol du laser en fonction de la pente du terrain, comme cela a été vu durant les expériences sur l'OHP (chapitre 3, section 3.2.2). La pente de la surface va également jouer un rôle important en créant une distorsion du signal lidar qui sera quantifiée. Cette distorsion peut conduire à une mauvaise détection de l'écho de sol et à des erreurs de plusieurs mètres sur les paramètres structuraux. Ceci sera d'autant plus vrai pour une empreinte au sol de taille importante, comme pour le cas d'une observation à partir de l'espace. Ce n'est pas le seul effet de distorsion, la diffusion multiple dans le couvert forestier peut également avoir un impact non négligeable sur le signal lidar, surtout quand on passe d'une longueur d'onde dans l'ultraviolet vers une dans le proche infra-rouge. Une évaluation de Monte Carlo montrera que cet impact peut être plus ou moins important en fonction de la longueur d'onde. Cette dernière distorsion aura surtout un impact sur le profil vertical d'extinction dans la canopée forestière et donc sur certains paramètres structuraux comme la localisation de la couronne des arbres.

Dans la partie 5.3, j'apporterai quelques compléments à l'étude présentée dans mon article.

5.2. Article: End-to-End Simulation for a Forest-Dedicated Lidar onboard a Satellite

Article

End-to-End Simulation for a Forest-Dedicated Full-Waveform Lidar Onboard a Satellite Initialized from Airborne Ultraviolet Lidar Experiments

Xiaoxia Shang * and Patrick Chazette

Laboratoire des Sciences du Climat et l'Environnement, Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives—Centre National de la Recherche Scientifique—Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, Gif sur Yvette Cedex 91191, France; E-Mail: patrick.chazette@lsce.ipsl.fr

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: xiaoxia.shang@gmail.com; Tel.: +33-1-6908-7889; Fax: +33-1-6908-7716.

Academic Editors: Peter Krzystek, Wei Yao, Yong Pang, Marco Heurich and Prasad S. Thenkabail

Received: 11 February 2015 / Accepted: 20 April 2015 / Published: 27 April 2015

Abstract: In order to study forests at the global scale, a detailed link budget for a lidar system onboard satellite is presented. It is based on an original approach coupling airborne lidar observations and an end-to-end simulator. The simulator is initialized by airborne lidar measurements performed over temperate and tropical forests on the French territory, representing a wide range of forests ecosystems. Considering two complementary wavelengths of 355 and 1064 nm, the end-to-end simulator computes the performance of spaceborne lidar systems for different orbits. The analysis is based on forest structural (tree top height, quadratic mean canopy height) and optical (forest optical thickness) parameters. Although an ultraviolet lidar appears to be a good candidate for airborne measurements, our results show that the limited energy is not favorable for spaceborne missions with such a wavelength. A near infrared wavelength at 1064 nm is preferable, requiring ~100 mJ laser emitted energy, which is in agreement with current and future spaceborne missions involving a lidar. We find that the signal-to-noise ratio at the ground level to extract both the structural and optical parameters of forests must be larger than 10. Hence, considering the presence of clouds and aerosols in the atmosphere and assuming a stationary forest, a good detection probability of 99% can be reached when 4 or 5 satellite revisits are considered for a lidar system onboard the ISS or ICESat, respectively. This concerns ~90%

of forest covers observed from the lidar, which have an optical thickness less than 3.

Keywords: link budget; spaceborne; canopy; lidar; simulation

1. Introduction

Forests are key components of surface-atmosphere interactions as demonstrated by previous studies [1–5]. They are sinks or sources for many atmospheric compounds that play major roles on the atmospheric chemistry such as the ozone cycle and the secondary organic aerosol formation [6–9]. Representing 80% of the continental biosphere carbon stock, forests also sequester large carbon dioxide from the atmosphere [9] and act as conservators of the biodiversity [10,11]. The biodiversity of forests depend on the three-dimensional (3D) distribution of canopy structures, which contains a substantial amount of information about the state of development of plant communities [12–16]. However the 3D canopy structures are not yet available at the global scale until now. Spaceborne observation, including passive and active remote sensing systems, is a good approach to get such information of canopy structures.

Passive multispectral and hyper-spectral sensors produce two-dimensional atmosphere/ground information, whereas their ability to represent 3D spatial patterns is limited. For instance, their use for tropical dense forests is not adequate because the remote sensor has difficulty to penetrate the upper canopy layer [17]. On the other hand, active sensors, including lidar and radar, have been shown to be valuable tools for 3D vegetation mapping and characterization. Recent developments in P-band radar technology and data processing techniques allow accurate estimates with a large spectrum of forest biomass [18–20]. For instance, the BIOMASS Earth Explorer mission selected by ESA in the framework of its Living Planet program is envisaged as a P-band spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite. This future space mission aims at providing consistent global estimates of the forest biomass, disturbances and re-growth. However, radar gives more information about the volume and is less efficient to reconstitute the forest vertical structure than lidar. Lidar therefore appears to be a complementary instrument for both short and medium-term spaceborne missions in the future.

Previous studies have been performed to evaluate the potential of spaceborne lidar systems [21–24]. Nevertheless, these authors did not take into account the orbits and the related atmospheric contribution in their studies. Moreover, the instrumental characteristics were not explicitly analyzed. A spaceborne backscatter lidar could provide a full description of the forest vertical structures [25], and forest dynamics resulting from deforestation (clear-cut), forest management, or climate change [26–28]. Lidar technology is now very mature, as demonstrated by the LITE experiment [29], the operational CALIPSO mission [30,31], and the ICESat mission [32]. Furthermore, the MOLI (Multi-Footprint Observation LiDAR and Imager) project selected by JAXA [33] and the GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation Lidar) project selected by NASA [34] would involve embedding on the International Space Station (ISS) a vegetation lidar system for forest studies. A large-footprint lidar (a few tens of meters' footprint at the ground level) can accurately map canopy structures and aboveground biomass [35–40], even in high-biomass ecosystems where passive optical and active radar sensors typically fail to do so.

In this paper, a detailed link budget for a canopy lidar system onboard satellite is presented. It complements the previously published works [21,22], by using an original approach coupling airborne lidar observations and an end-to-end simulator. This work has been conducted based on field experiments specifically conducted over French forests between 2008 and 2014. It aims at a pre-feasibility study of a spaceborne lidar dedicated to forest survey, required before a future Assessment Phase (Phase-0) by the Centre National d'Etude Spatial (CNES).

In Section 2, we present our semi-empirical approach, by describing the end-to-end simulator (including the direct and inverse models), the sampling sites, and the adjustment of parameters. In Section 3, using the end-to-end modeling in ultraviolet (UV) and near infrared (NIR) wavelengths, the footprint size, the optimal signal-to-noise ratio (SNR), and the signal distortion are discussed in detail. In Section 4, the link budget for several platforms is presented for the two selected wavelengths (355 and 1064 nm). The atmospheric scattering properties and the orbital configuration are also considered in our numerical simulations.

2. Methodology

2.1. Overview

The modeling of the lidar signal can be achieved based on a semi-empirical approach using the airborne lidar measurements and the radiative transfer equation applied to the laser beam propagation into a scattering medium (leaves, branches, trunks). The lidar instrument ULICE (Ultraviolet Lidar for Canopy Experiment) was embedded on an Ultra-Light Aircraft (ULA) (Figure 1) as for previous atmospheric [41] and canopy [25] studies. It performed airborne measurements over different forest biomes between 2008 and 2014, from temperate to tropical forests, to obtain a representative database of lidar vertical profiles. This database is used to initialize analytical and statistical modeling of the lidar signal, so as to simulate spaceborne observations.

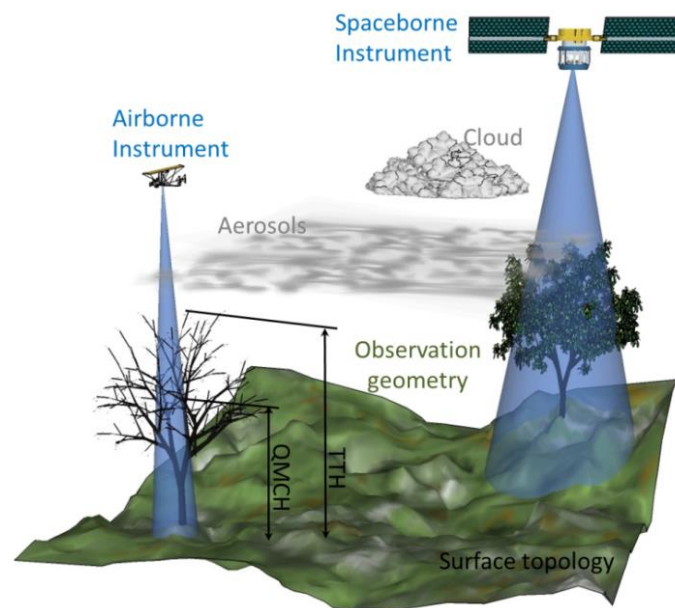


Figure 1. Illustration of airborne and spaceborne lidar measurements.

The canopy lidar or topographic lidar typically use wavelengths in the near infrared (NIR, *i.e.*, 1064 nm), which corresponds to the fundamental emission of a commercial solid-state Nd:YAG laser. However, we will show that there are significant multiple scattering (MS) effects on the retrieval of forest structures at this wavelength, because of the high reflectance of the vegetation. These effects distort the lidar profile and make it difficult to locate the ground echo (GE) and the canopy echo (CE). Doubling the fundamental frequency, the Nd:YAG laser emits at 532 nm but it is quite difficult to get the eye-safe condition with such a wavelength. Thus, a laser operating at an ultraviolet (UV) wavelength (355 nm) was used in our airborne lidar measurements, which is available with the Nd:YAG laser using a non-linear crystal by tripling the fundamental frequency. The use of the UV spectral domain leads to a significant reduction of the MS effects in the forest structures and relaxes the constraints for operating eye-safety measurements.

In order to characterize a forest site, three key parameters were derived from lidar backscatter profiles: (1) tree top height (TTH), a basic parameter for forest studies which is calculated as the distance between the first return at the upper surface of the vegetation and the last return of the ground surface [25,42]; (2) quadratic mean canopy height ($QMCH$), a structural parameter which can be used to evaluate the aboveground biomass [15,42]; (3) extinction coefficient (α), an optical property indicating forest characteristics (e.g., canopy density and forest category) closely related to the forest optical thickness (FOT). All the structural and optical parameters are linked to the lidar equation as shown in Section 2.2.

An end-to-end simulator (EES) was specifically developed for this study, which is a powerful tool to simulate and analyze the performance of airborne and spaceborne lidar systems. It is composed of a direct model and an inverse model. The block diagram of EES is shown in Figure 2. From airborne lidar measurements (e.g., lidar profile S), forest parameters (*i.e.*, TTH_0 , $QMCH_0$, α_0 in Figure 2) can be derived from the inverse model so as to initialize the direct model. Meanwhile, four types of external data (in the blue bloc of Figure 2) were used to provide additional necessary constraints to the direct model: (1) an instrument model, including instrumental parameters of the lidar system and related uncertainties; (2) an atmosphere model, which includes the atmospheric contributions (*i.e.*, molecular, aerosol and cloud optical thickness); (3) surface characteristics, which provide the necessary surface information and identify forest and non-forest areas as well as forest types at the global scale; (4) an orbit model, in order to simulate the different possible orbits for spaceborne lidar systems.

Lidar vertical profiles were simulated by the direct model. The main sources of noise were taken into account considering normal statistical distributions. Next, estimated forest parameters (*i.e.*, \widehat{TTH} , \widehat{QMCH} , $\widehat{\alpha}$ in Figure 2) for each simulated lidar profile (\tilde{S}) were derived by the inverse model. The comparison between these estimated parameters and the initial values presented as inputs of the direct model was then performed in the “*comparison module*”. The assessments of the standard deviation and bias of each parameter, and of the related signal-to-noise ratio (SNR), have been done following a Monte Carlo approach [43]. For each statistical simulation we used 200 statistical draws which thus ensured a normal distribution around the mean values. The main components of the EES will be detailed below.

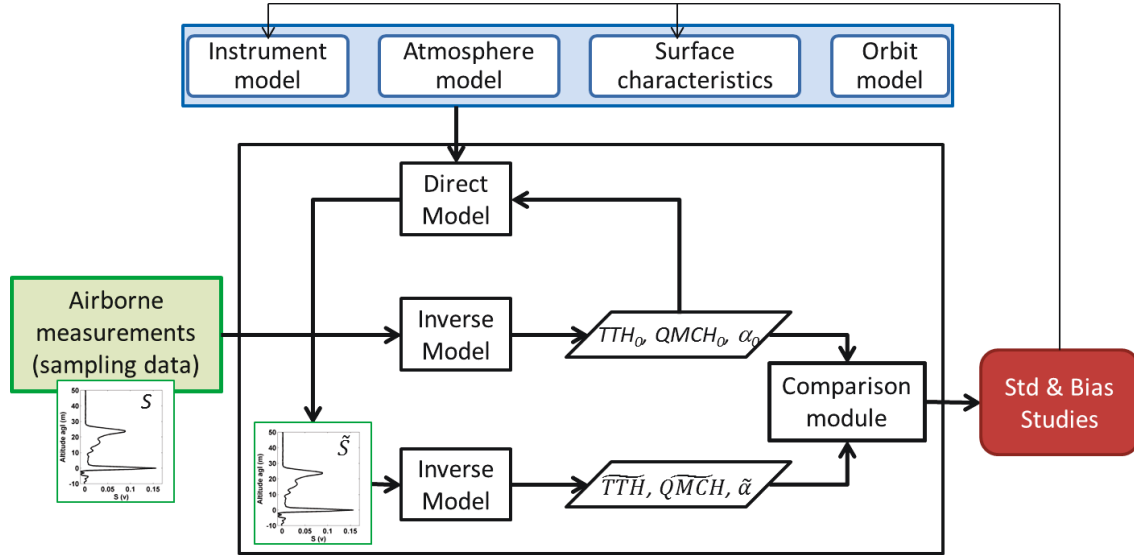


Figure 2. Block diagram of the end-to-end simulator. Both the standard deviations and the bias of the tree top height (TTH), the quadratic mean canopy height ($QMCH$) and the extinction coefficient (α) are computed using a Monte Carlo approach. TTH_0 , $QMCH_0$ and α_0 are initial values derived from the real lidar signal S . \bar{TTH} , \bar{QMCH} and $\bar{\alpha}$ are estimated values derived from the simulated lidar profile \tilde{S} for each statistical draw.

2.2. Direct Model

Lidar signals from both air- or space-platform can be expressed by the lidar equation [44]. The backscattered lidar signal S_v above the ground, for a nadir measurement taken at a height above ground level (agl) h in the forest (with a ground altitude z_{ground}) and a wavelength λ , is given by [44]:

$$\begin{aligned}
 S_v(\lambda, h) &\approx K(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot \frac{1}{\left(Z_p - (h + z_{ground})\right)^2} \cdot BER(\lambda, h) \cdot \alpha_{FOT}(\lambda, h) \\
 &\cdot \exp \left[-2 \left(\frac{FOT(h)}{2} \cdot \eta(\lambda, h) + \tau(h) \right) \right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

where we supposed that the atmospheric backscattered part in the canopy is negligible compared to the larger backscattered part of the canopy. The instrumental constant $K(\lambda)$ and the laser energy $E(\lambda)$ are defined in the “*instrument model*” (Section 2.2.1, Equation (3)). FOT is the forest optical thickness (cf. Section 2.3) and τ is the total atmospheric optical thickness as defined in the “*Atmosphere model*” (Section 2.2.2). The backscatter to extinction ratio $BER(\lambda, h)$ and the multiple scattering coefficient η are defined in the “*Surface characteristics*” (Section 2.2.3). The BER , which is linked to tree species, can be also interpreted as the probability of photons backscattered after the interaction of the laser beam and the forest materials. Z_p is the altitude agl of the platform, which is defined in Section 2.2.4. The canopy extinction coefficient $\alpha_{FOT}(\lambda, h)$ is defined as the sum of the absorption and scattering coefficients, which can be obtained from airborne lidar measurements through the inverse model for different forest biomes. The canopy extinction coefficient can be considered as the same at both NIR and UV wavelengths because leaves are large scatters compared to the wavelength.

The integrated range-corrected ground return, R_g , was used to represent the ground echo (GE). The GE waveform, considered as following a Gaussian distribution [45], can be calibrated by using the returned laser pulse at nadir over a flat surface. We defined $g(h)$ as a normalized Gaussian distribution and ΔZ_{GE} as the equivalent width of the GE, the integrated ground return can be simulated by introducing the surface reflectance (ρ_g) as follows:

$$\begin{cases} R_g(\lambda, Z_p) = \int_{-\frac{\Delta Z_{GE}}{2}}^{\frac{\Delta Z_{GE}}{2}} S_g(z) \cdot (Z_p - z_{ground})^2 \cdot dz \\ R_g(\lambda, Z_p) = K(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot \exp\left[-2\left(\frac{FOT(0)}{2} \cdot \eta(\lambda, 0) + \tau(0)\right)\right] \cdot \frac{\rho_g}{\pi \cdot \Delta Z_{GE}} \cdot \int_{-\frac{\Delta Z_{GE}}{2}}^{\frac{\Delta Z_{GE}}{2}} g(z) \cdot dz \end{cases} \quad (2)$$

Different noises were also considered in the direct model, and the detailed noise sources are discussed in Appendix A.

2.2.1. Instrument Model

There are two detection modes for lidar systems: photon-counting and analog detections [44]. The backscattered lidar signal S is expressed in volt or in number of photoelectrons in analog or photon-counting detections, respectively. The corresponding instrumental constant $K(\lambda)$, which includes all instrumental parameters, is expressed as:

$$K(\lambda) = \begin{cases} \frac{\lambda}{hc} \cdot QE \cdot OE \cdot A \cdot \Delta z & \text{photon – counting detection} \\ OE \cdot A \cdot G \cdot R_c \cdot \frac{c}{2} & \text{analog detection} \end{cases} \quad (3)$$

where QE and OE are the quantum efficiency of the photo-detector and the total optical efficiency of the lidar system, A is the surface of the receptor (e.g., telescope), G is the system gain of both the pre-amplification and the detector, and R_c is the load resistance. The Planck constant and the light velocity are h ($\sim 6.62 \times 10^{-34}$ J·s) and c ($\sim 3 \times 10^8$ m·s⁻¹) respectively.

In our model, both the UV and NIR wavelengths were considered (*i.e.*, 355 and 1064 nm). The corresponding instrumental parameters were chosen according to the existing spaceborne lidar systems. The most commonly used photo-detectors in UV and NIR are the photomultiplier tube (PMT) and the avalanche photodiode (APD), respectively. State of the art PMTs/APDs were considered for our simulations with their quantum efficiency (QE) and gain (G) shown in Table 1. The optical components (optical efficiency (OE), Table 1) used for these two wavelengths domains have similar properties. Other instrumental parameters (*i.e.*, A , R_c , Δz) were considered as the same for both wavelengths in our simulations (Table 1).

2.2.2. Atmospheric Model

The total optical thickness $TOT(h)$, in the lidar equation sense as defined by Measures [44], is the sum of half the forest optical thickness (FOT) and the total atmospheric optical thickness (τ).

$$\begin{cases} TOT(h) = \frac{FOT(h)}{2} + \tau(h) \\ \tau(h) = MOT(h) + AOT(h) + COT(h) \end{cases} \quad (4)$$

Considering

$$X(h) = \int_h^{Z_P} \alpha_X(z) \cdot dz, \text{ with } X = FOT, MOT, AOT, \text{ or } COT \quad (5)$$

where MOT is the molecule optical thickness, AOT is the aerosol optical thickness, and COT is the cloud optical thickness. α_X is the extinction coefficient associated to each component X . FOT will be discussed in Section 2.3.

Table 1. Instrumental, atmospheric and surface parameters chosen for the simulation.

Wavelength		λ (nm)	355	1064
Instrument model		QE	85%	35%
		G (A·W ⁻¹)	~10 ⁶	~10 ³
		OE	60%	65%
		Telescope diameter \varnothing (receptor surface A)	100 cm (~0.8 m ²)	
		Δz (m)	0.75	
		R_c (Ω)	50	
Atmosphere model	Ideal	AOT ₀	0.15	0.15
		MOT ₀	0.58	0.0065
		COT ₀	0	0
	Realistic	AOT	Varied ¹	
		COT		
			ρ_g (sr ⁻¹)	0.022
Surface characteristics	BER_{simu} (sr ⁻¹)	0.0065	0.0455	
	BER_{adjusted} (sr ⁻¹)	0.005	0.035	
	η	1	0.96	

¹ Derived from MODIS observations.

Two atmospheric conditions are used in the model. Under the ideal atmospheric condition, there is no cloud ($COT_0 = 0$), and typical medium values of AOT and MOT are considered (AOT_0 and MOT_0), which are given in Table 1 for 2 wavelengths (355 and 1064 nm). However, realistic spaceborne observations are often performed in presence of clouds and aerosol plumes, which decreases the atmospheric transmission of laser beams. Hence, realistic atmospheric conditions are also used to improve the simulations. MODIS observations of COT and AOT are used in our model, which are considered to be representative. The AOTs are derived from the MODIS daily aerosol product MOD04 at the horizontal resolution of 10 km [46]. As AOT s are only given at 470, 550, and 660 nm, the Angstrom Exponent coefficients are used to estimate the AOT s at 355 and 1064 nm [47]. The COT s are derived from the MODIS daily cloud product MOD06 at the 1 km horizontal resolution [46], whereas the corresponding positions are derived from the MODIS geolocation product MOD03 [46].

2.2.3. Surface Characteristics

Surface reflectance (ρ_g) was calculated by Equation (2) using the ground echoes of many airborne lidar sampling profiles. The values of ρ_g at 355 nm are found to be similar for all these measured profiles: $\rho_g = 0.022 \pm 0.002 \text{ sr}^{-1}$. Tang *et al.* [48] found out the surface reflectance at 1064 nm: $\rho_g = 0.14 \pm 0.03 \text{ sr}^{-1}$. We will use these values for all our simulations.

Backscatter to extinction ratio (BER) was calculated from the scattering phase function (P) inside the canopy:

$$BER = \frac{1}{4\pi} \cdot \omega_0 \cdot P_\pi \quad (6)$$

where ω_0 is the single scattering albedo of scatters and P_π is the backscatter scattering phase function. There is little information about P , especially at the scale at a lidar footprint size of a few meters. As in Chen *et al.* [49], the Bidirectional Reflectance Distribution Functions (BRDF) from passive spaceborne measurements (multi-angular satellite POLDER data) was used to retrieve P using semi-empirical models, even though they are retrieved with pixels of several kilometers. More detailed BRDF modeling are given in Appendix B. Bendix *et al.* [50] show the variation of absorption and scattering with wavelength: there is strong absorption and little scattering in UV, whereas there is ~ 7 times more scattering in NIR. However, regarding the reflectance spectral dependency as documented in the same study, the behavior of the 490 nm (resp. 865 nm) channel seems very close to the one for the UV (resp. NIR) wavelength of 355 nm (resp. 1064 nm). The corresponding P_π of the 490 nm (resp. 865 nm) channel can then be used for simulations at 355 nm (resp. 1064 nm). Both mean value and standard deviation of the retrieved P_π are given in Table 2 for each considered forest type. They lead to a BER close to $0.007 \pm 0.002 \text{ sr}^{-1}$ (resp. $0.046 \pm 0.002 \text{ sr}^{-1}$) in UV (resp. NIR). These BER values were used in the following simulations and supposed constant in the canopy.

Table 2. Backscatter scattering phase function (P_π) derived from the multi-angular satellite POLDER data. The absorption coefficient is also given.

Period	P_π in “Mixed Forest”		P_π in “Evergreen Needle Leaf”		Absorption Coefficient ($1 - \omega_0$)	
	490 nm	865 nm	490 nm	865 nm	355 nm	1064 nm
January	1.79 ± 0.32	1.52 ± 0.15	1.62 ± 0.48	1.57 ± 0.15	~ 0.95	~ 0.35
July	1.36 ± 0.42	1.36 ± 0.16	1.65 ± 0.44	1.53 ± 0.21		

Multiple scattering coefficient (η), at different depths in the scattering layer, is deduced from the ratio between the total lidar signal (including single scattering S_{single} and multiple scattering $S_{multiple}$) and the number of single-backscattered photon as [29]:

$$\eta(h) = 1 - \frac{\ln\left(\frac{S_{single}(h) + S_{multiple}(h)}{S_{single}(h)}\right)}{FOT(h) - FOT(h_t)} \quad (7)$$

where h_t is the top of the scattering layer.

The Multiple scattering (MS) effects in UV are negligible, and the typical value is $\eta \sim 1$. However the MS effects may become significant compared to the single scattering when switching from UV (355 nm) to NIR (1064 nm). Thus, for the Monte Carlo simulation, the MS coefficient (η) in NIR is derived as 0.96 ± 0.03 for different conditions (e.g., different space missions). The MS effects may impact the structural parameters retrieved from NIR lidar measurements and the associated uncertainties have to be assessed from the simulations.

Land-cover type is obtained with the MODIS product [46]. This parameter helps us choose the study areas. Two MODIS land-cover type yearly products (chosen arbitrary for 2011) are used to identify the forest area: MCD12C1 (horizontal resolution of 0.05°) and MCD12Q1 (horizontal resolution

of 500 m). The classification scheme ("*Land Cover Type I*"), defined by the International Geosphere Biosphere Programme (more information are available online [51]), is used in our simulations.

2.2.4. Platform Model

Airborne lidar. The main characteristics of the lidar system ULICE are given in Table 3. The laser energy (E) is deliberately oversized (~ 7 mJ), which is compensated by optical densities ($OD = 3$) at the reception, in order to limit the parasitic signal related to the sky radiance. The vertical sampling resolution (Δz) along the lidar line-of-sight depends on the sampling frequency of the digitizer card and the laser pulse duration. The Centurion laser has a laser pulse duration between 6 and 7 ns, so the sampling frequency is chosen between 100 and 500 MHz leading to vertical sampling between 0.3 and 1.5 m. The vertical sampling of 0.75 m was the one most frequently chosen for the acquisition the lidar profiles used in the simulations. The pulse repetition frequency (PRF) is defined on the basis of the footprint sampling density needed in the forest sites and the aircraft speed, which ranges from 5 to 100 Hz for a full-waveform lidar system and was chosen to be 20 Hz during the field campaigns [42]. The energy distribution of laser beam is Gaussian according to the calibration in the laboratory. It can be considered as homogeneous for airborne measurements with small footprints (< 5 m), but has to be taken into account for spaceborne measurements with larger footprints. The laser footprint size at the ground level is defined by the laser beam divergence and the platform altitude. Airborne lidar measurements were performed for flight altitude close to 350 m agl. According to the divergence of the laser, it leads to footprints between 2 and 5 m in diameter over the temperate forests, and ~ 10 m in diameter for tropical forests. These profiles can be further recombined to simulate profiles in a compatible footprint of a spaceborne lidar.

Spaceborne lidar systems. Lidar systems have been already embedded onboard the satellites. Even though none of their purposes is to detect and sample forests, some instrumental parameters and the orbits of the main spaceborne lidar missions can be considered as the references for our simulations. Four missions were chosen and will be considered: the Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) onboard the past mission ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite) to detect ice-elevation changes in Antarctica and Greenland [52]; the future Climate Mission MERLIN (Methane Remote Sensing Lidar Mission) with the payload of a Methane Integrated Path Differential Absorption (IPDA) LIDAR emitting at 1645 nm, dedicated to the measurements of the greenhouse gas Methane [53]; the near-future ADM-Aeolus (Atmospheric Dynamics Mission Aeolus) mission carrying the Atmospheric Laser Doppler Instrument (ALADIN) for global wind profile observations [54]; the current CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) mission carrying the Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP) to improve the understanding of the role of aerosols and clouds in the Earth's climate system [55]. The International Space Station (ISS) is also considered as a potential platform for a future spaceborne canopy lidar system, an example of recent mission CATS (Cloud-Aerosol Transport System) for the atmospheric purpose is given at [56].

Actual parameters of these referenced spaceborne lidar missions were found out through research papers [53,57–60], and are given in Table 3. As they were not designed for forest studies, the sampling vertical resolution (Δz) for CALIPSO, MERLIN, and ADM-Aeolus missions is too large. Their parameters

are then modified for a 0.75 m resolution as the one of our airborne lidar ULICE. The Δz of the ICESat mission keeps its own value since one of its targets is the surface study.

Table 3. Actual parameters for ULICE and referenced spaceborne lidar missions.

Mission Lidar	Our Study ULICE	CALIPSO ¹ CALIOP	ICESat ¹ GLAS	MERLIN ¹ IPDA	ADM-Aeolus ¹ ALADIN	ISS -
Orbit altitude z_p (km)	0.35	705	600	506	400	350
Wavelength λ (nm)	355	1064	1064	1645	355	-
Laser Pulse Energy E (mJ)	0.007 ²	110	73	9	120	-
QE	20%	33%	35%	60%	85%	-
OE	26%	64%	55%	65%	60%	-
Telescope diameter (cm) (surface A (m ²))	15 (0.02)	100 (0.79)	100 (0.79)	55 (0.24)	150 (1.77)	-
Δz (m)	0.75	*	0.15	*	*	-

* the actual Δz cannot be used for forest sampling, and chosen to be 0.75 m; ¹ These parameters of spaceborne lidar missions were found out through research papers [53,57–60]; ² Calculated by $E_0/10^{OD}$ with emitted laser energy $E_0 = 7$ mJ and optical densities $OD = 3$.

2.3. Inverse Model

In order to retrieve forest vertical structures, it is necessary to detect the intensity peaks of both the canopy and ground echoes in the full-waveform lidar signals. The *TTH* is calculated as the distance between the first return at the upper surface of the vegetation and the last return from the ground surface. Following the signal processing described in Shang and Chazette [42], the ground echo was first detected compared to the noise level, which can be inferred from the signal remaining after the ground echo when only the instrumental noise exists. The canopy echo was then detected, considering the atmospheric signal just above the trees.

To simplify the calculation, the range-corrected lidar signal is introduced, which is defined as the product of the backscattered lidar signal $S_v(h)$ and the square of the distance between the laser emission and the target. The integrated canopy signal $R_v(h)$ is defined as the integral of the range-corrected lidar signal from the canopy top *TTH* to height level h . As *BER* is assumed to be constant for all canopy levels (*i.e.*, BER_0) and $\eta \sim 1$ in UV, $R_v(h)$ can be expressed, after correction of the atmospheric transmission, as:

$$\begin{cases} R_v(h) = \int_h^{TTH} S_v(z) \cdot (Z_p - (h + z_{ground}))^2 \cdot dz \\ R_v(h) = K_0 \cdot E_0 \cdot BER_0 \cdot [1 - \exp(-FOT(h))] \end{cases} \quad (8)$$

The *FOT* can then be derived as:

$$FOT(h) = -\ln \left(1 - \frac{1}{K_0 \cdot E_0 \cdot BER_0} \cdot R_v(h) \right) \quad (9)$$

The *FOT*, defined as the optical thickness in a forest layer between the considered height h and the canopy top *TTH*, depends on the canopy extinction coefficient α_{FOT} , which is then derived from Equations (4) and (9) as:

$$\alpha(h) = \frac{\partial \ln \left[1 - \frac{1}{K_0 \cdot E_0 \cdot BER_0} \cdot R_v(h) \right]}{\partial h} \quad (10)$$

This solution is consistent with the one derived from the statistic consideration made by Lefsky *et al.* [15]. Canopy extinction coefficient is a fundamental parameter used in our direct model to simulate the lidar signal by using the lidar equation under the hypothesis of “single scattering”.

The *QMCH* (quadratic mean canopy height) parameter, which can be used to evaluate the aboveground biomass [42], is also a function of the extinction coefficient [15]:

$$QMCH = \sqrt{\int_{TTH}^0 \alpha(h) \cdot h^2 \cdot dh} \quad (11)$$

2.4. Sampling Sites

Several forest sites have been sampled between 2008 and 2014 to build significant sample sets of different ecosystems, from temperate to tropical forests (Table 3). Our first airborne lidar measurement was conducted over the Landes forest, located in the southwest of France (44°N, 1°W) and mainly composed of maritime pines. The second experiments were carried out, during both winter and summer season, above the Fontainebleau forest in the southeast of Paris (48°N, 2°E), which is a temperate deciduous forest composed of evergreen and broadleaf trees. Forests of white oaks and a plantation of poplars in and close to the OHP (Observatoire de Haute-Provence, 44°N, 6°E) were also sampled during spring 2012. Recently, airborne lidar measurements were conducted in May 2014 over several tropical forest sites of Réunion Island (21°S, 55°E), including rain and montane cloud forests.

Table 3. Description of the sites sampled with the airborne lidar ULICE between 2008 and 2014.

Forest Sites	Land Cover ¹	Main Tree Species	Location	Sampling Date	Sampling Area	Laser Shots
Landes	Temp.Conif.	Maritime pins	44°9'N, 1°9'W	September 2008	170 ha	62.3 × 10 ³
Fontainebleau	Temp.Deci.	Oaks, Sylvester pines,	48°24'N,	November 2010	25 ha	86.9 × 10 ³
	Temp.Conif.	Hornbeams and Beeches	2°38'E	June 2012	4000 ha	1.2 × 10 ⁶
				March 2013	5 ha	41.8 × 10 ³
OHP ² Region	Temp.Deci. Plantation	White oaks Poplars	43°49'N, 5°49'E	May 2012	10 ha	29.5 × 10 ³
Réunion Island	Trop.Rain	Labourdonnaisia calophylloides	21°4'S, 55°30'E	May 2014	5 ha	12 × 10 ³
	Trop.montane cloud	Acacia heterophylla	21°21'S, 55°44'E	May 2014	420 ha	48.4 × 10 ³

¹ Temp.: temperate, Conif.: conifer, Deci.: Deciduous, Trop.: tropical; ² OHP: Observatoire de Haute Provence.

The tree species included in the sampled sites of temperate forests constitute about 70% of the ones encountered in the western European forests (distribution maps of tree species are available from the European Forest Genetic Resources Programme website: [61]). Temperate forests significantly impact the atmospheric chemistry and mainly the ozone concentration in the troposphere, especially at

regional scales [2]. Although composed of small trees, the rainforests of the Réunion Island are representative of many tropical forest areas in terms of density [62]. For the boreal forests, the lidar budget is easier to be built because they are less dense. If the lidar-derived information is reliable for the low-/mid-latitude (tropical/temperate) forests, it will also be reliable for the higher latitudes.

Nine plots of ~5 ha were studied, representing different biomes. (1) 3 plots in Fontainebleau forest: a forest plot of oaks and hornbeams sampled in winter 2010, a wild broadleaf forest plot sampled in summer 2012, and a plot of the same location sampled in winter 2013, which represent temperate deciduous trees in two typical seasons; (2) 1 plot of white oaks in OHP Region, representing temperate deciduous trees in spring; (3) 2 plots in Landes forest in September 2008, for different mature (~50 and ~10 years, respectively) maritime pines, representing temperate conifer trees, which do not change much with the seasons; (4) 2 plots of tropical forests on Réunion Island in May 2014, one for tropical lowland rainforest, and the other for tropical montane cloud forests; (5) 1 plot of plantation of poplars in OHP Region in June 2012. The *FOT* and *TTH* of every lidar profiles in each plot were calculated through the inverse model; their mean and standard deviation values are shown in Figure 3. The temperate deciduous forests have a small *FOT* in winter but a big *FOT* in summer, because of tree crowns with dense leaf amounts. The *FOTs* of temperate conifer forests of different ages (different *TTHs*) are similar. The tropical forests are dense and have a big *FOT* as expected. However, the results show that the wild temperate broadleaf forests in summer can be denser than the studied tropical forests. These distributions of *FOTs* and *TTHs* will be considered in our simulator.

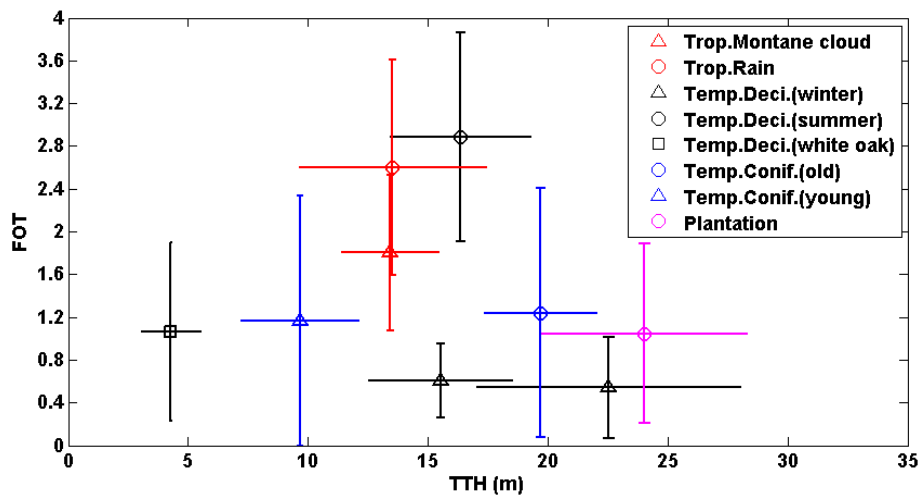


Figure 3. Mean (marker) and standard deviations (line segments) of lidar-derived forest optical thickness (*FOT*) and tree top height (*TTH*) for 9 forest plots. Trop.: tropical, Temp.: temperate, Deci.: Deciduous, Conif.: conifer.

In the previous plots, several representative profiles were selected as the input of the EES for the numerical simulations. The vertical profiles of the extinction coefficient of sampling profiles were calculated through the inverse model; six of them are shown in Figure 4 as examples. The extinction coefficient not only significantly varies from one site to another, but also varies within each sampled site. The selected sample profiles are located at the center of the distribution in terms of both α and *FOT* in the sampled site.

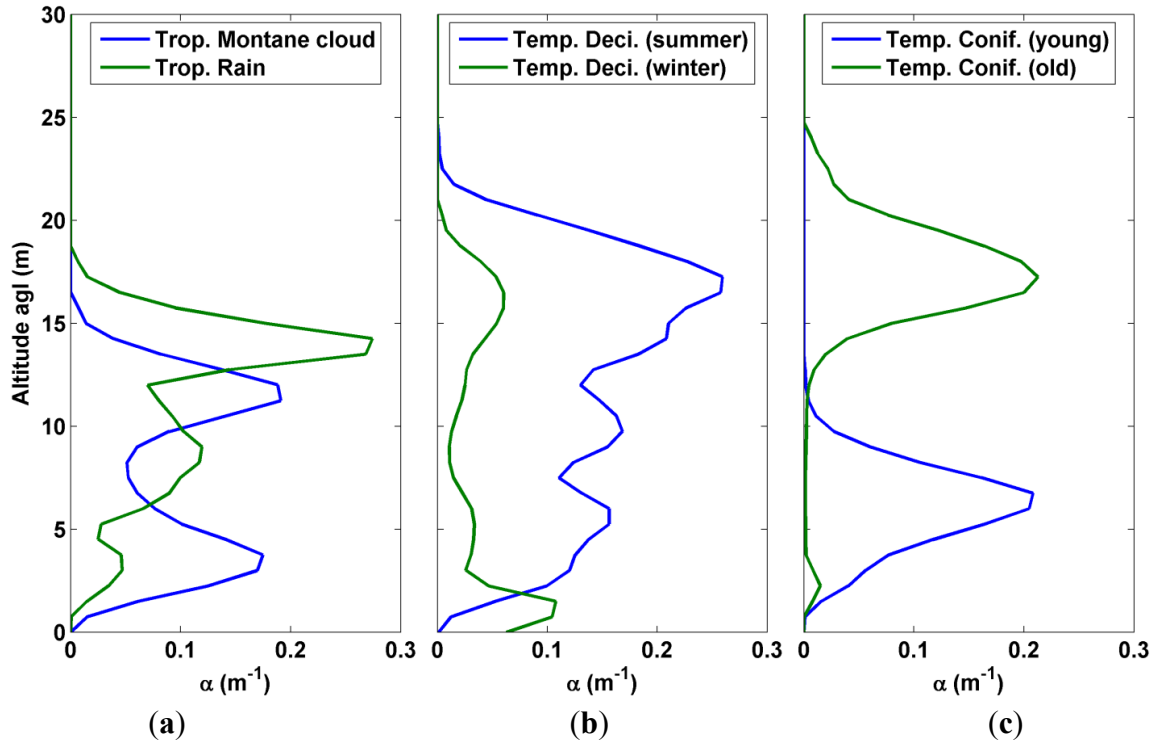


Figure 4. Examples of extinction coefficient profiles of 6 selected lidar profiles: (a) tropical montane cloud and rain forest; (b) temperate deciduous forest in both summer and winter, and (c) temperate conifer forest with young (10 years old) and old trees (50 years old).

The tropical montane forest represents an approximate average of the measured biomes (Figure 3). A detailed distribution of the *FOT* is given in Figure 5 for this case, which will be considered as the reference in the following.

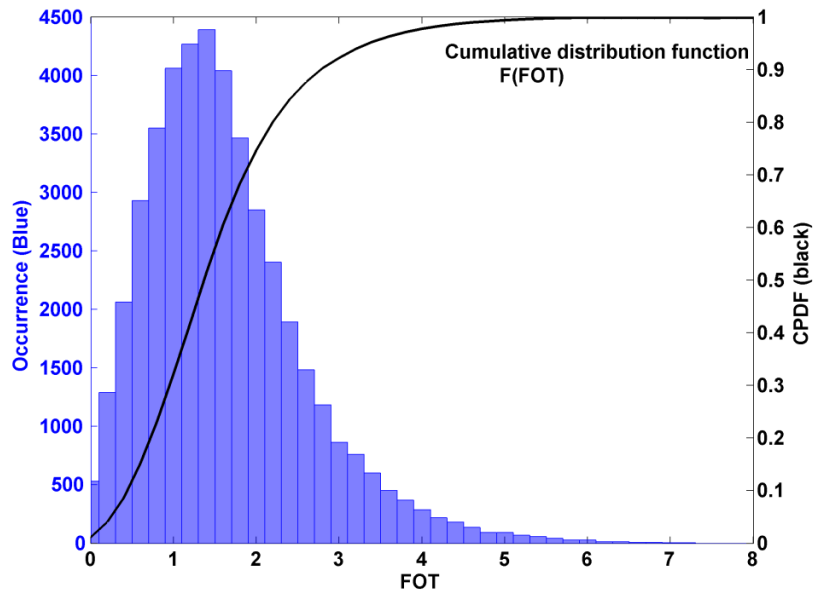


Figure 5. Blue bars: Forest optical thickness (*FOT*) distribution in tropical montane cloud forest (Table 3). Black curve: cumulative probability density functions (CPDF)/Cumulative distribution function **F** of *FOT*.

2.5. Adjustment of Parameters: Relevance of the Direct Model

For a given vertical profile of the extinction coefficient (α), simulated lidar profile can be calculated by using the direct model (Section 2.2). However, before these simulations, it is necessary to adjust two important parameters involved in the lidar equation: the instrumental constant $K(\lambda)$, and the backscatter to extinction coefficient BER in the canopy. They have been adjusted by comparing the simulation with the measurements for each forest site.

$K(\lambda)$ needs to be adjusted because of uncertainties on several optical components of the lidar (e.g., transmittance of optical lenses, laser energy, detector gain). The molecular extinction and backscatter coefficients are determined based on the polynomial approximation proposed by Nicolet [63] as in Chazette *et al.* [64]. The aerosol contribution has been assessed during the ascent of the ULA as in Chazette *et al.* [41]. Note that for all the sites, the aerosol optical thickness between the ground and the ULA was less than 0.03. Hence, we found a relative correction within 5% on $K(\lambda)$.

The BER in the canopy previously retrieved was used for the sampling cases. Nevertheless, the simulated profiles did not exactly match the measurements by $\sim 30\%$, because of the hypotheses used in our simulations. Therefore the BER in UV was adjusted to $0.005 \pm 0.002 \text{ sr}^{-1}$ by comparing measured and simulated canopy signals via the EES. Such a value is very close to the initial value and it is in the error tolerance ($\sim 30\%$) for a simulator.

Taking into account these adjustments, the lidar profile can be well simulated as an example given in Figure 6. The ground-echo is well reproduced, as well as the response of the forest below 28 m agl. The simulated lidar signal in the atmosphere, *i.e.*, above ~ 28 m agl, also matches very well with the measurements. The direct model is thus found relevant for realistic simulations from airborne and spaceborne platforms.

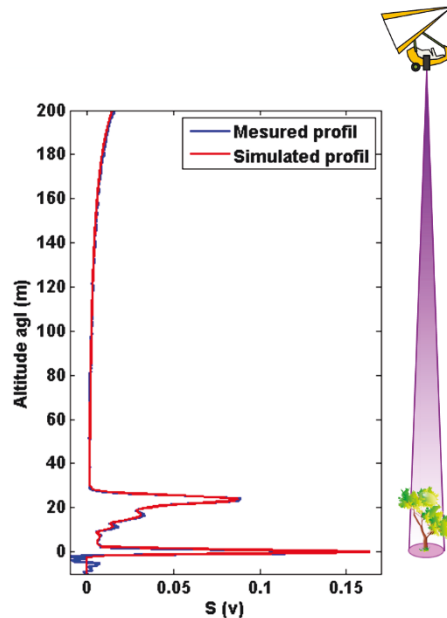


Figure 6. Simulated lidar signal (**Red**) superposed on measured lidar signal (**Blue**) as an example in temperate deciduous forests in winter. Lidar signal S is in volt.

3. End-to-End Modeling

In this section, the retrievals of structural and optical parameters from the simulations of an airborne/spaceborne lidar system working at both wavelengths of 355 nm and 1064 nm are studied through the end-to-end simulator (EES). We assess the optimal laser footprint size and signal-to-noise ratio (SNR). Both the surface slope and the multiple scattering effects on the lidar signal are computed and discussed.

3.1. Laser Footprint Size

For a given PRF, the small-footprint of the laser beam at the ground level brings more details and accuracy to assess forest vertical structures; whereas the large-footprint increases the probability of ground echo detections by increasing the laser penetration ability. The latter is more suitable for spaceborne lidar observations.

In our airborne measurements performed at 355 nm, a small-footprint size (~ 2 m in diameter at the ground level) was used for temperate forests. With this footprint size the laser penetration is good enough to detect forest vertical parameters for deciduous forests in winter and conifer forests. The probability density functions (PDF) of GE detections (PDF_{GE}) for lidar profiles was found to be ~ 1 for these cases. However, PDF_{GE} in summer for temperate deciduous forests was found to be ~ 0.2 . This was due to the signal attenuation by canopy leaf strata and the effects of the ground cover vegetation. We performed the lidar measurements by increasing the footprint size to be ~ 4 m in diameter for the same site, leading to a $PDF_{GE} \sim 0.4$. The footprint size was increased to be ~ 10 m for tropical forests, which improved the capacity of the laser penetration in the canopy. As it was found that 10 m is not enough for ground echo detections (70% probability) through dense forests ($FOT > 3$), the footprint diameter has to be set to a larger value, which will be a compromise between the probability to detect the ground, the horizontal sampling density of lidar footprints, and the SNR.

To simulate large laser footprints, lidar profiles measured with a small footprint size (e.g., 2 m) were combined to get a simulated lidar profile with a larger footprint size (as schematized in Figure 7), taking into account the Gaussian energy distribution of the laser beam.

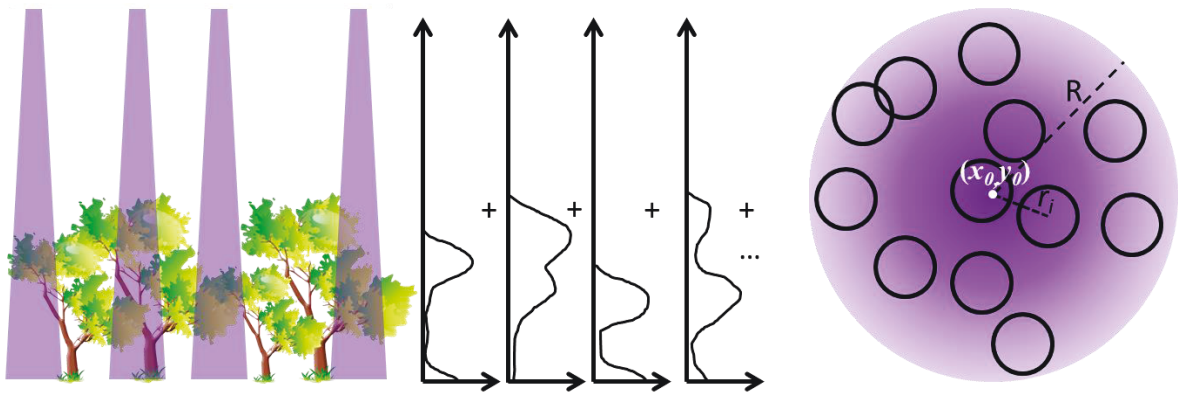


Figure 7. Illustration of the combination of lidar profiles to simulate a lidar signal of a larger footprint. R is the radius of the simulated larger footprint, r_i is distance between i^{th} laser shot and the simulated footprint center (x_0, y_0) .

The sample case of temperate deciduous forests in summer was chosen, since the corresponding FOT is the biggest one. By entering different footprint sizes into our model, corresponding PDF_{GE} was calculated through simulated lidar profiles. A relationship between PDF_{GE} and the footprint diameter was found as shown in Figure 8, which indicates an optimal laser footprint diameter of ~ 20 m for the oak forest in summer ($FOT \approx 3$). This optimal footprint of 20 m diameter will be considered in the following.

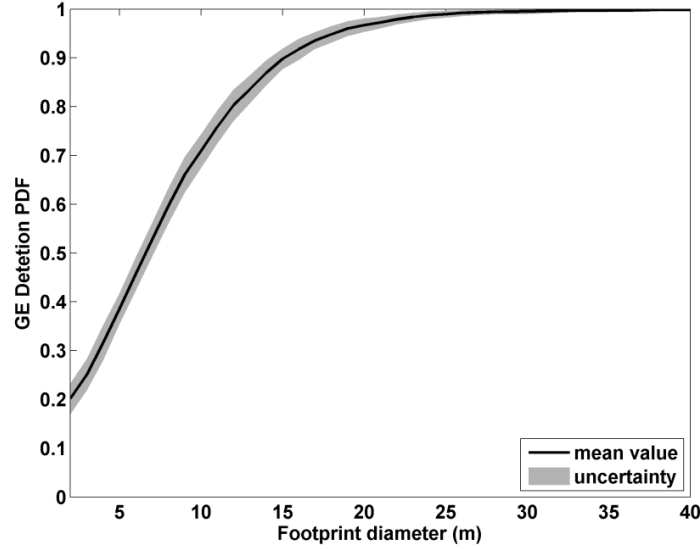


Figure 8. The probability density functions (PDF) of the good detection of the ground echo (GE) vs. footprint diameters.

3.2. Optimal SNR and Related Uncertainties

The optimal SNR is defined as the minimal one to get a good detection of forest parameters. The SNR at the ground level (GE SNR) is chosen as an indicator for the evaluation. Of course, a better detection can be obtained for a greater SNR, but the lidar characteristics are strongly constrained for air- and space-borne systems by this parameter. Getting a lower SNR, there will be less constraint on the payload (e.g., energy, mass, volume).

Optimal SNR for GE detection. The input signals are simulated from airborne measurements considering a 20 m footprint. By applying the EES, the PDF of the ground echo (GE) detection vs. the GE SNR is derived (Figure 9). The result shows that the optimal SNR at the ground level to get a good GE detection is ~ 6 .

Optimal SNR for forest parameters. The GE detection is not sufficient to ensure a good assessment of both forest vertical structures and optical parameters. Therefore, the optimal SNR is studied by considering the uncertainties on these parameters. The acceptable uncertainty on the lidar-derived TTH (ϵ_{TTH}) and $QMCH$ (ϵ_{QMCH}) is 1.5 m and 5%, respectively, as described in Shang and Chazette [42]. The uncertainty on α depends on the one on FOT . Hence, the FOT at the canopy bottom, which is an integrated value, was preferred for this study instead of α . Figure 10 gives the results of the relative error simulations to retrieve the TTH , $QMCH$ and FOT for different GE SNR. We can consider that sufficient accuracy can be obtained for all parameters for a GE SNR larger than 10. In the following, the link budget of the spaceborne lidar was then assessed using the optimal $SNR_0 = 10$.

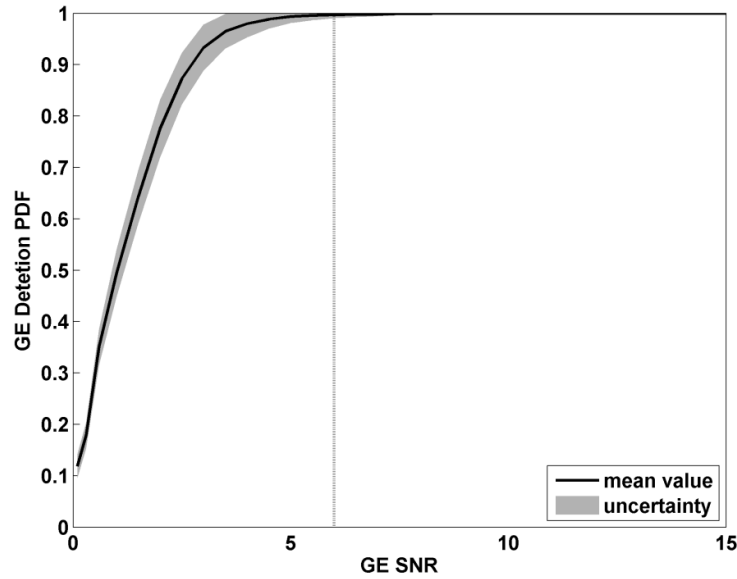


Figure 9. The probability density functions (PDF) of the good detection of the ground echo (GE) vs. SNR at the ground level (GE SNR). The optimal SNR of 6 is highlighted by the black vertical dotted line.

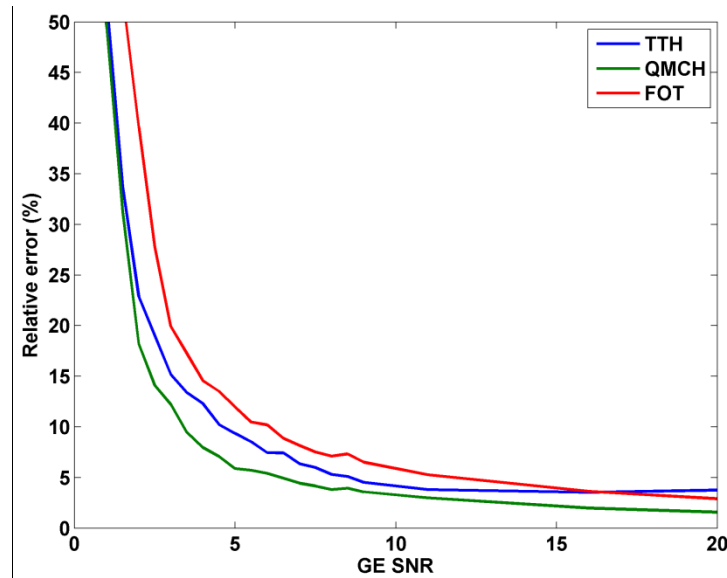


Figure 10. Uncertainties ¹ on *TTH*, *QMCH* and *FOT* for different GE SNR. ¹ Mean values for all sampling sites.

3.3. Lidar Signal Distortion

3.3.1. Surface Slope

As highlighted by Yang *et al.* [65] and Hancock *et al.* [66], surface slope has an effect on the lidar accuracy for large footprint lidar systems. This lidar signal distortion due to the surface slope may be no longer negligible when considering a footprint of 20 m in diameter. It affects both the canopy and the ground echoes and may modify their locations in a lidar profile and the SNR level. In this way, it impacts the link budget of the lidar system. Simulations were operated over a simulated homogenous

forest containing identical trees (see the illustration of Figure 11a). On the one hand, different ground slopes (0° , 15° , 30° and 45°) were applied for a combined lidar signal in a 20 m footprint. Results (Figure 11b) show that the lidar profile is strongly affected by slopes larger than 30° . On the other hand, different footprint sizes (5m, 20m and 40 m) were used for a ground slope of 30° (Figure 11c). As expected and shown in Figure 11, the lidar signal decreases and the distortion increases when the slope or the footprint size increases. This leads to a dispersion of the ground echo on a larger altitude range and to a loss of precision when retrieving the structural parameters. For instance, a slope of 30° and a footprint of 20 m in diameter lead to a relative uncertainty of 10%–30% on *TTH*, *QMCH* and *FOT*. This means the surface slope effect has to be considered in the link budget of spaceborne lidar observations; which is equivalent to a decrease of $\sim 50\%$ of the GE SNR and then leads to significant increase of the necessary lidar payload (e.g., emitted energy, telescope diameter).

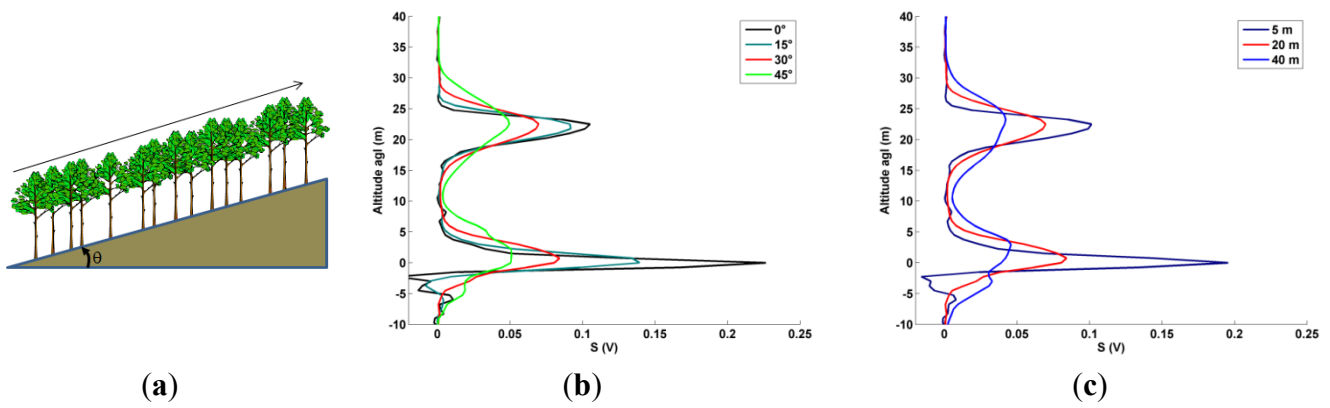


Figure 11. (a) Illustration of the simulation of a forest site with a slope θ ; (b) Example of different lidar signal simulated through the canopy of Fontainebleau for different slopes between 0 and 45° for a footprint of 20 m; (c) Example of different lidar signal simulated for different footprint sizes with slope of 30° .

3.3.2. Multiple Scattering Effects

The multiple scattering (MS) contributions are taken into account through the MS coefficient η [29], and depend on the wavelengths [66]. As previously explained (Section 2.2.3), this effect is negligible in UV (355 nm, $\eta \approx 1$), but not in NIR (1064 nm, $\eta \approx 0.96$). An example of simulations in UV is given in Figure 12a; there is no much difference between the single scattering signal (green curve) and the total simulated signal (single and multiple scattering, cyan curve). Simulations in NIR for the same conditions are given in Figure 12b; the multiple scattering contributions (red curve) significantly affect the lidar signal. By comparing the single scattering signal and the total simulated signal, bias of ~ 2 – 3 m can be observed on the location of the tree crown and relative errors of $\sim 5\%$ were found on the *QMCH* and *FOT* estimations. This result also confirms the study of Kotchenova *et al.* [67], who highlighted that multiply scattered photons magnify the amplitude of the reflected signal, especially that originating from the lower portions of the canopy. Similar uncertainty may affect the location of the ground echo if there is undergrowth. Such bias can be partially corrected after the retrieval of the vertical profile of the extinction coefficient and will be ignored hereafter. Note that the

multiple scattering effects can be corrected at the first order considering the FOT. It will not be taken into account hereafter.

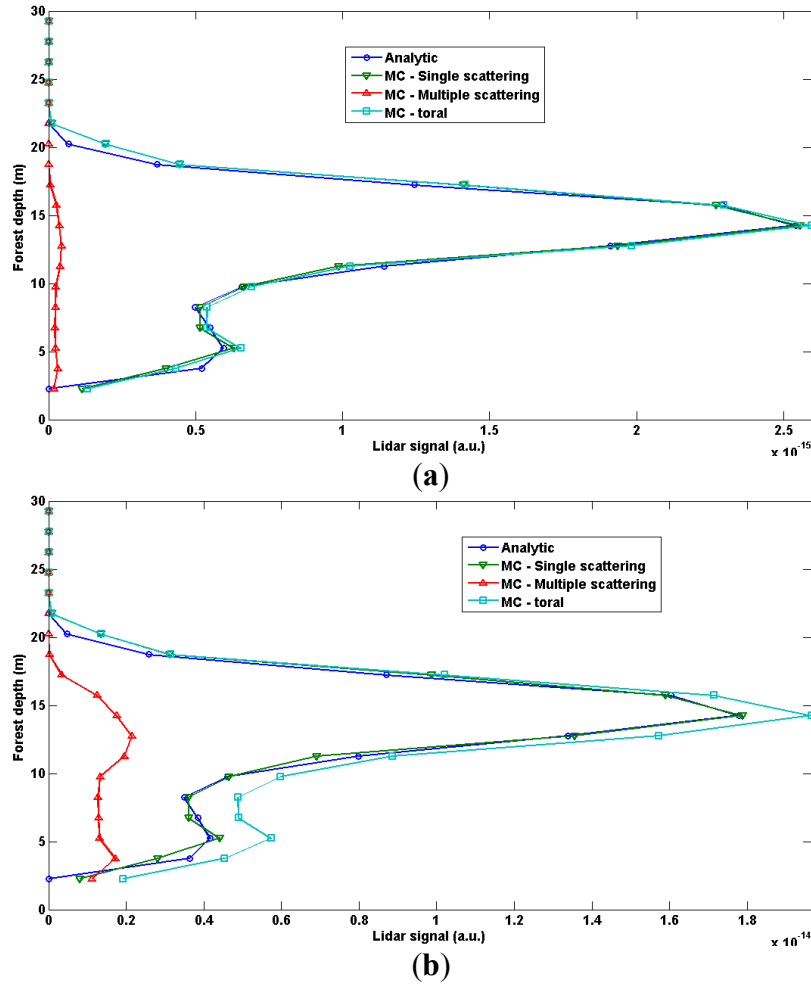


Figure 12. Multiple scattering effect simulations at (a) 355 nm and (b) 1064 nm for oaks in summer by using a similar orbit of ISS at 350 km.

4. Link Budget

In this section, the link budget of spaceborne lidar systems will be discussed. We defined realistic orbits based on past and current satellites (see Table 3). Two typical areas were chosen for boreal and tropical forests, which are the main carbon reservoirs. The sites were analyzed during the seasons where the probability of having a significant cloud cover is minimal. In our link budget, we took into account the decrease of the SNR due to the aerosol and cloud optical thicknesses which are derived from operational satellite measurements (MODIS) chosen arbitrary for 2011. The different working hypothesis and the corresponding results are presented in this section.

4.1. Link Budget under Ideal Atmospheric Conditions

The link budget is firstly studied under ideal atmospheric conditions (Atmosphere model in Table 1). In our simulation, only shot noise is taken into account as the others noise sources can be considered negligible (see Appendix A). The SNR of lidar signals depends on the instrumental

parameters, the atmospheric optical thickness, the surface characteristics and the platform altitude. For a given lidar system, the SNR decreases exponentially as the FOT increases.

Firstly, we considered the actual instrumental parameters of the four referenced spaceborne lidar missions (CALIPSO, ICESat, MERLIN, and ADM-Aeolus) as shown in Table 3. Here we considered two types of forest with FOT of 1 or 2. The corresponding GE SNR of these spaceborne lidar systems are calculated, and given in Table 4. Lidar products of the ICESat mission have been used for forest studies (e.g., [48,68–70]). Through the results of our EES, the *GLAS* lidar can well mapping the open forest with a $FOT \leq 1$, which occupies $\sim 30\%$ of the forest area by considering the FOT distributions derived from our airborne lidar measurements. But it cannot well study denser forests with a larger FOT due to a low SNR.

Table 4. SNR at the ground level (GE SNR) of lidar signal by using actual parameters of four spaceborne lidar missions (Table 3), and the Atmosphere model and Surface characteristics in Table 1.

Mission		CALIPSO	ICESat	MERLIN	ADM-Aeolus
Lidar		CALIOP	GLAS	IPDA	ALADIN
Orbit altitude z_p (km)		705	600	506	400
GE SNR	$FOT = 1$	24.5	10.0	9.1	12.9
	$FOT = 2$	14.8	6.1	5.5	7.9

Secondly, our EES simulations were performed for lidar systems with same instrumental parameters (given in Table 1) onboard five spatial platforms: CALIPSO, ICESat, MERLIN, ADM-Aeolus, and ISS. The values of required energies (E) were found out at both the UV and NIR wavelengths

(Table 6), by considering getting SNR ~ 10 at the ground level.

These simulations show that it will be difficult to detect dense forests ($FOT > 2$) at a UV wavelength. Even for the ISS, the required energy of the lidar system is ~ 220 mJ to detect a medium dense forest ($FOT = 2$), which means good detections for temperate deciduous forests in winter and temperate conifer forests, but poor detections for temperate deciduous forests in summer or tropical forests. The values of E retrieved in the NIR domain are more realistic for a spaceborne mission because they remain lower than 80 mJ for medium dense forests ($FOT \leq 3$), which represent $\sim 90\%$ surface of the forest area according to the referenced FOT distribution (Figure 5). Thus, only the NIR domain will be considered hereafter for the link budget for realistic atmospheric conditions. Obviously, the low orbit will be preferred for dense forests ($FOT > 2$).

Accounting for the above considerations, for a given lidar system and a chosen orbit, there is a maximum value of the total optical thickness (TOT_{max}) for which the ground echo is still detectable. The lower the orbit is, the larger TOT_{max} will be, as expressed by Equation (1). If we take an example of a lidar system with instrumental parameters given in Table 1, emitting 100 mJ laser pulses at 1064 nm, the TOT_{max} for systems onboard five spaceborne platforms were calculated and given in Table 6. As in Equation (4), the TOT is the sum of half the FOT and the total atmospheric optical thickness τ , the latter one is equal to 0.1565 under ideal atmospheric conditions (Table 1). Then, we can get the corresponding FOT_{max} (maximal forest optical thickness) to study the forest density limit of each spaceborne lidar system.

Table 6. Required energy E in 355 nm or 1064 nm to get a good detection (GE SNR ~ 10) under ideal atmospheric conditions for 4 forest classes. Each class represents forests with forest optical thicknesses (FOT) less than a certain value (1, 2, 3, 4). The corresponding area proportion of each forest class among the total forest area is also given. An example of maximum value of the total optical thickness (TOT_{max}) at which the detection is still good, for a lidar system emitting 100 mJ at 1064 nm, is also given. The instrumental parameters used are given in Table 1.

Orbit			CALIPSO	ICESat	MERLIN	ADM-Aeolus	ISS
Orbit altitude z_p (km)			705	600	506	400	350
Required laser pulse energy	Forest class	Forest area proportion					
E (mJ) at 355 nm	$FOT \leq 1$	30%	333.6	241.7	171.9	107.4	82.2
	$FOT \leq 2$	75%	906.9	656.9	467.2	292	223.5
	$FOT \leq 1$	30%	11.4	8.3	5.9	3.7	2.8
E (mJ) at 1064 nm	$FOT \leq 2$	75%	31.0	22.5	16.0	10.0	7.7
	$FOT \leq 3$	92%	84.4	61.1	43.5	27.2	20.8
	$FOT \leq 4$	98%	229.4	166.1	118.2	73.8	56.5
Example: laser pulse energy $E = 100$ mJ at the wavelength of 1064 nm							
TOT_{max} for good detection ($TOT = FOT/2 + \tau$, Equation (4))			1.74	1.90	2.07	2.31	2.44

FOT : forest optical thickness. TOT : total optical thickness. τ : total atmospheric optical thickness.

4.2. Link Budget under Realistic Atmospheric Conditions

Spaceborne observations are always performed in presence of clouds and aerosol plumes, which increase the total atmospheric optical thickness τ and decrease the SNR. In this section the effect of cloud and aerosol covers are taken into account to complete the previous link budget performed under ideal atmospheric conditions. We first present the assumptions of the study and finish by the results and discussions.

4.2.1. Study Areas

The link budget is performed on the most important forest types. The tropical and boreal forests are the broadest ones with surface of $\sim 2000 \times 10^6$ (10% of land) and $\sim 1000 \times 10^6$ ha, respectively (by the Office National des Forêts, [71]). From the global land-cover map in 2011 derived from MODIS product MCD12C1 as shown by Figure 13a, we chose two areas of 10×6 (shown by the black boxes in Figure 13a): one is located in Congo basin (Africa) (1°N , 20°E) which represents the tropical forest with the dominant land-cover of evergreen broadleaf forests; the other is located in North-Asia (58°N , 101°E), close to the lake Baïkal in Russia, which represents boreal forests with mainly mixed forests and a few needleleaf forests. The more accurate land-cover maps derived from MCD12Q1 (MODIS) for the two selected areas (shown in Figure 13b) were used in our model.

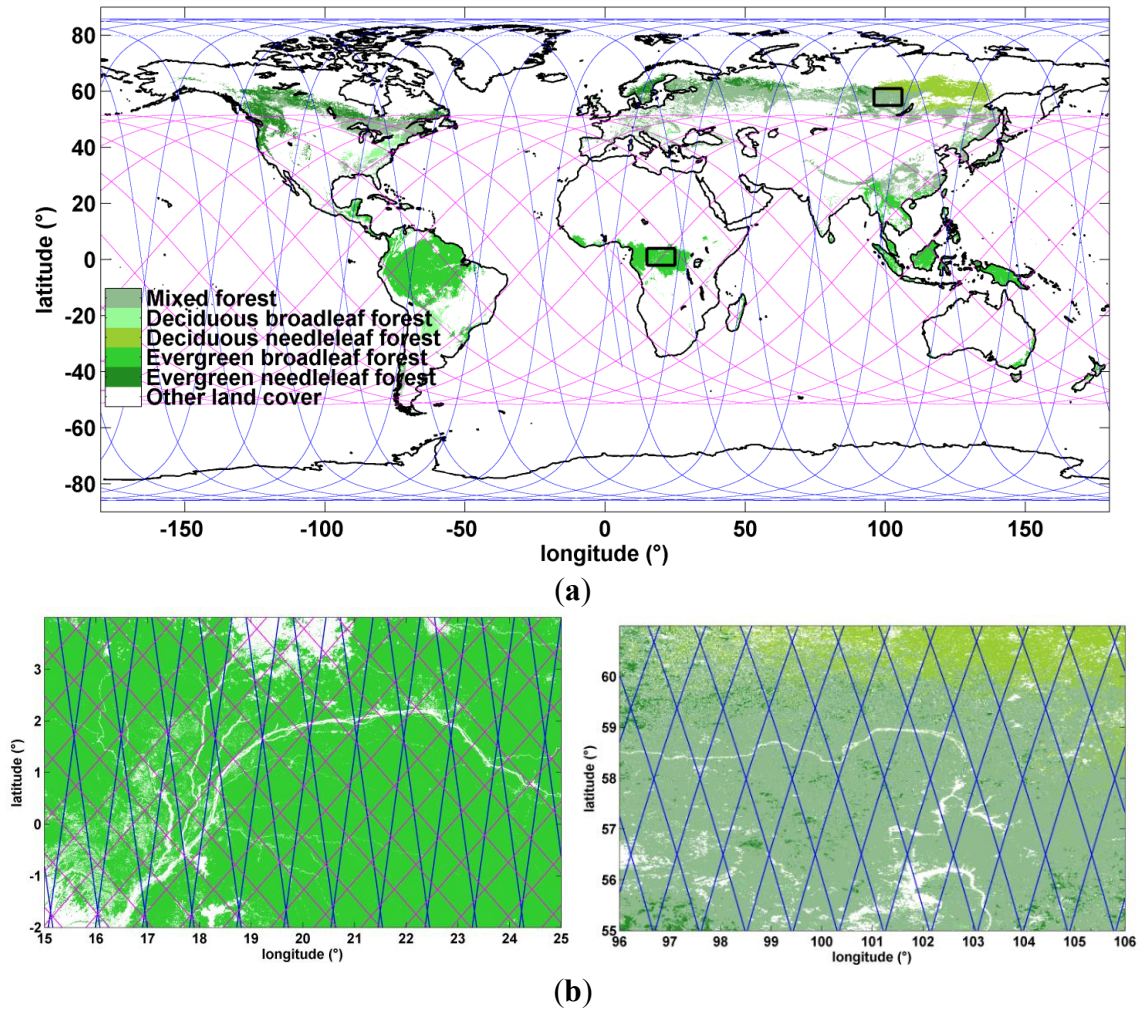


Figure 13. (a) Simulated orbits of ISS (in pink) and ICESat (in blue) of 1 day over the simplified land-cover map derived from MCD12C1 (MODIS) of 2011 with a spatial resolution of 0.05° ; (b) Simulated orbits of 26 days over the Congo basin (Africa) zone (**left**) and lake Baïkal (Asia) zone (**right**), land-cover maps were derived from MCD12Q1 (MODIS) of 2011 with a spatial resolution of 500 m. The different green colors indicate five dominant forest types as named in (a).

4.2.2. Study Periods

For each area, we selected one month for the simulation. The ideal period is when there are fewer clouds and smaller AOT . The European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) model gives the probability of high, middle, low and total cloud cover at the global scale, at a spatial horizontal resolution of 0.75° and a temporal resolution of 6 hours [72]. The mean values and standard deviations of the probabilities of cloud presence over the considered areas of each month of 2011 are studied. The monthly AOT is derived by using the MODIS Atmosphere Monthly Global Product MOD08_M3 at the horizontal resolution of 1° [46], which is also considered for the two areas. There is no AOT value for the North-Asian site during the winter due to excessive cloud cover. We thus chose December and June for the Congo basin and Lake Baïkal areas, respectively, when the average monthly probability of cloud is the lowest in order to promote the cloud free condition.

4.2.3. Orbit Simulation

The existing orbits were considered to perform orbit simulations. The ISS is the first candidate, since there are most resources (e.g., enough energy supply) available onboard. The second one is the ICESat, because the onboard GLAS lidar was already used for some forest studies [68–70,73–75]. The SPOT (Satellite for observation of Earth) could be another candidate, but its altitude (832 km) is too high for lidar measurements. Thus, the two existing orbits of ISS and ICESat were chosen for the simulation by using their respective orbital characteristics, because they are more realistic for the proposed mission. Note that the inclination of the ISS orbit does not permit measurements in the higher latitudes.

The revisit cycle of both orbits was chosen to be 26 days, as for the SPOT mission, which is dedicated to surface survey. The simulated orbits are shown in Figure 13, with 1 day's revolutions for the global area and 26 days' revolutions for the 2 selected areas.

4.2.4. Atmospheric Distributions

The sampling frequency of the onboard lidar is chosen to be 10 Hz by taking into account the spatial horizontal resolutions of the considered satellite data (no significant statistical differences are observed for higher PRF). For each lidar shot, the corresponding *AOT* and *COT* were derived from the nearest (in space and time) MODIS data. For one revisit cycle, we calculated the distribution (histogram) and then the cumulative distribution function $F(\tau)$ of the total atmospheric optical thickness τ for the lidar shots inside the two selected areas (Figure 14).

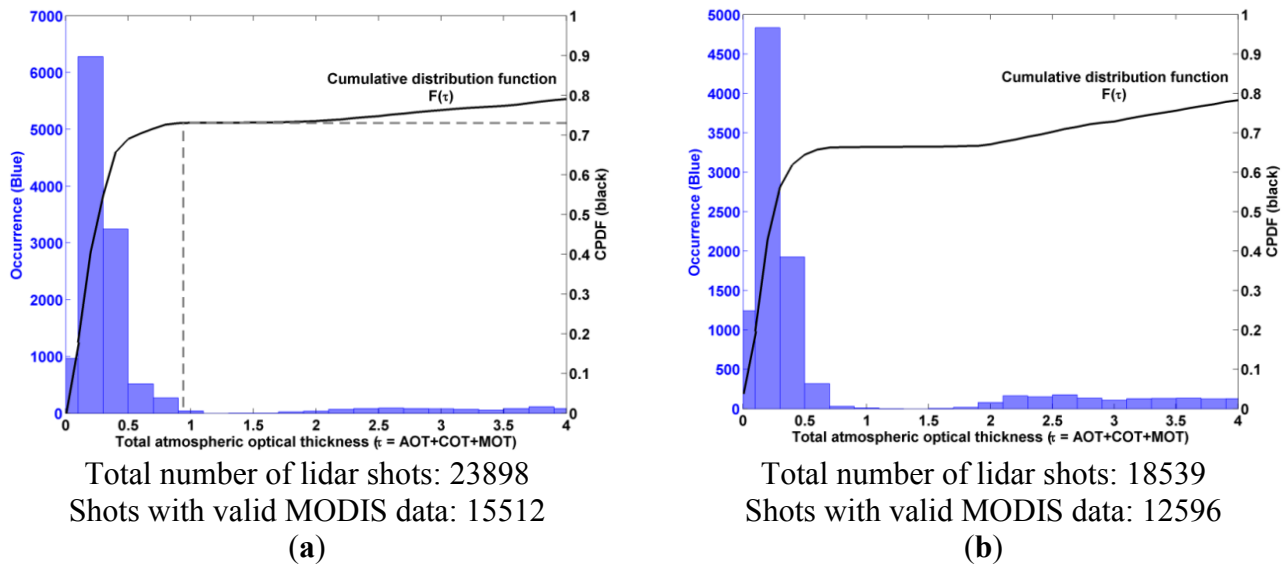


Figure 14. Cont.

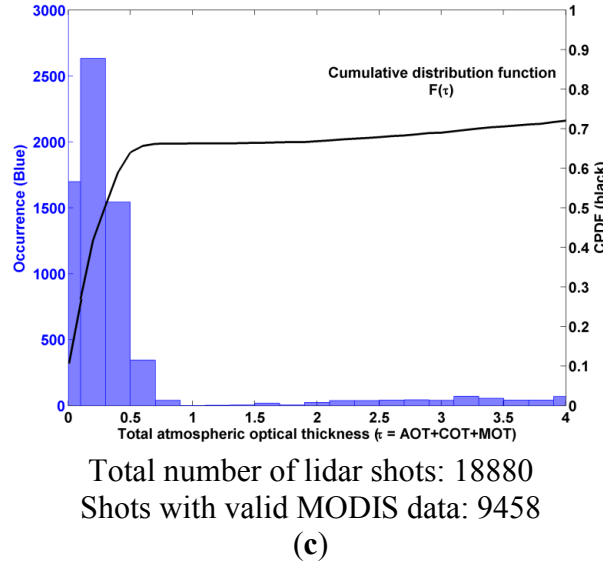


Figure 14. Blue bars: distribution¹ of total atmospheric optical thickness τ at 1064 nm for one revisit cycle (26 days) of the satellite over the two selected areas: Congo basin (Africa, tropical forest) and Lake Baïkal (Russia, boreal forest) with 2 satellite orbits (ISS and ICESat). Black curve: cumulative probability density functions (CPDF) of τ . The number of the lidar shots following ISS/ICESat orbit inside each selected area is given, as well as the corresponding valid value number of τ given by MODIS. ¹ The distribution is truncated at 4. (a) ISS—Congo basin area; (b) ICESat—Congo basin area; (c) ICESat—Lake Baïkal area.

4.2.5. Discussion on Probability of Good Detections for One Satellite Pass

As mentioned before, for a given lidar system and a chosen orbit, there is a TOT_{max} below which the detections are always good ($SNR_{GE} \geq 10$). The atmospheric and the forest optical thicknesses are then complementary. A value of FOT is associated with each single lidar profile; if $FOT \leq 2TOT_{max}$ the probability of good detections depends on the probability distribution of τ , $F(\tau)$. This probability can be computed by:

$$p = F\left(TOT_{max} - \frac{FOT}{2}\right) \quad (12)$$

For example, TOT_{max} has been found as equal to 2.44 when considering an emitted energy ~ 100 mJ for a NIR lidar payload embedded onboard the ISS. If we want to detect forest with $FOT \leq 3$, which correspond to 92% of the forest from our FOT distribution reference, this probability is $p = F(\tau = 0.94) \sim 0.73$ (see the gray dash line in Figure 14a). With the same lidar onboard ICESat, we found $TOT_{max} = 1.90$ and then $p = 0.62$ and 0.59 for tropical and boreal forests, respectively. These TOT_{max} values are reported in Table 6 for each relevant spaceborne mission.

4.2.6. Number of Satellite Revisits

Until now the link budget accounted for the forest detection using only one lidar profile (*i.e.*, one satellite revisit). The number of satellite revisits can be increased to improve the probability of good detection. Considering the forest to be stationary, for k passes of the satellite over the same forest pixel, the probability (P) of having at least one good detection is given by:

$$P = 1 - (1 - p)^k \quad (13)$$

Obviously, the number of required revisits k changes with FOT values. Taking the previous examples of observations of tropical forest site with $FOT = 3$, if we want a probability of good detection $P \geq 0.99$ (an arbitrary choice), we need $k = 4$ or 5 when considering a lidar system onboard the ISS or ICESat, respectively.

This number of revisits is important because it will strongly influence the spatio-temporal resolution of the lidar sampling from a spaceborne platform. There is a compromise to find between the revisit cycle and the sampled forest area. An increase of k induces a larger distance between satellite ground tracks, unless considering longer integration periods, exceeding a month. For a tropical forest that is not to change much during the year, we can consider a sample with a number of revisits spread over one year. The distance between the ground-tracks will be reduced (~ 50 km). For forests that change with the season, it will be better not to exceed one month and thus to increase the distance between the ground tracks. Hence, there is a trade-off between the temporal resolution, spatial resolution and payload (telescope size, energy). The solution also depends on the technical capabilities.

5. Discussion and Conclusions

Airborne lidar measurements were performed over several temperate and tropical forests sites, which allowed for building a representative database of lidar vertical profiles. From these lidar measurements, a semi-empirical approach was applied using the radiative transfer equation applied to the laser beam propagation into a scattering medium. An end-to-end simulator was developed to simulate and analyze the performance of both air- and space-borne lidar systems. The uncertainties on structural and optical parameters (tree top height, quadratic mean canopy height, and extinction coefficient) for spaceborne observations were estimated. The surface slope and the multiple scattering effects on the lidar signal were discussed, and proved to be not negligible for spaceborne observations leading to a relative error $\sim 10\%$ – 30% on the retrieved parameters. The optimal signal-to-noise ratio was discussed for both ultraviolet (UV) and near infrared (NIR) wavelengths. The link budget for several platforms was built up for the two selected wavelengths (355 and 1064 nm), first under ideal atmospheric conditions (*i.e.*, no cloud and medium aerosol content: aerosol optical thickness of 0.15), and then considering more realistic atmospheric scattering properties.

We confirm that the UV wavelength is suitable for airborne lidar measurements. However, UV lidar is not a good candidate for spaceborne missions due to low atmospheric transmission and strong absorption by the vegetation in the UV domain. The required energy in UV is ~ 30 times larger than in NIR through our simulations. It may be possible to use a UV lidar with ~ 80 mJ energy onboard the ISS platform, but only for forests with an optical thickness less than 1, corresponding to temperate deciduous forests in winter or temperate conifer forests. Hence, a wavelength in the NIR is preferred for a spaceborne lidar system dedicated to forest survey at the global scale, as medium dense forests (e.g., $FOT \sim 2$) can be well detected for all considered orbits from the ISS to the CALIPSO missions. But for the denser forests (e.g., temperate deciduous forests in summer or tropical forest with $FOT > 2$), a lower orbit is preferred and the number of satellite revisits should be increased to reach a good detection probability.

Spaceborne lidar dedicated to canopy can also be used for atmospheric studies because the emitted energy needed for forest study is comparable to the one of missions as CALIPSO. It can be a

continuation of the CALIPSO/CALIOP or further the ADM-Aeolus/ALADIN or EARTHCARE [76] missions. A specific spaceborne canopy lidar mission has been considered as a priority in the medium term by the French space agency following its prospective seminary held at La Rochelle in 2014.

Acknowledgment

The experiments have been funded by the Centre National d'Etudes Spatiales (CNES, English: National Centre for Space Studies) and the Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA, English: French Alternative Energies and Atomic Energy Commission). The authors also thank the support offered by the Direction Générale de l'Armement (DGA, English: General Directorate for Armament). The POLDER/PARASOL BRDFs databases, offered by CNES, have been elaborated by the LSCE, and provided by the POSTEL Service Center. The authors are grateful to Fabien Marnas and Julien Totems for their help during the lidar experiments. The authors also thank Nicolas Baghdadi, Patrick Rairoux, Shushi Peng and Julien Totems for reviewing this paper.

Author Contributions

Both authors contributed extensively to the work presented in this paper.

Appendix A: Sources of Noise

For an instrumental link budget the contribution of each noise source has to be considered. There are five different and independent kinds of noise: the background-radiation noise, the shot noise (σ_S), the dark-current noise (σ_D), the Johnson-Nyquist noise (σ_{JN}), and the quantification noise (σ_Q). Their standard deviations are expressed by the symbol σ .

The background-radiation noise is negligible in our airborne measurements, because a strong optical density (OD ~ 3) was used to compensate the large field-of-view (~ 4 mrad). It is also negligible in our simulated spaceborne measurements with a much smaller field-of-view (< 57 μ rad). We take an example of a NIR (1064 nm) lidar system onboard the ISS with instrument parameters shown in Table 1, and an interference filter of 0.45 nm bandwidth [60]. Via the 6S radiative transfer modeling [77] for the worst case (*i.e.*, solar and satellite zenith angles are both 0°), the background sky radiance was found to be $0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$. The background light is then evaluated [44] as 1.8×10^{-7} A, which is negligible compared to the lidar signal.

In analog detection mode, lidar signal S is expressed in volt with R_c the load resistance. Since the noise was expressed as a current, the signal-to-noise ratio (SNR) can be expressed as follows [44]:

$$SNR = \frac{S/R_c}{\sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_D^2 + \sigma_{JN}^2 + \sigma_Q^2}} \quad (\text{A.1})$$

The standard deviations of each noise can be expressed by [44]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_S(\lambda, h) = \sqrt{\frac{G \cdot \frac{hc}{\lambda} \cdot \zeta \cdot c}{2 \cdot \Delta z \cdot QE \cdot R_c}} \cdot S(\lambda, h) \\ \sigma_D = G \cdot NEP \cdot \sqrt{\frac{c}{4 \cdot \Delta z}} \\ \sigma_{JN} = \sqrt{\frac{k_B \cdot T_K \cdot c}{R_c \cdot \Delta z}} \\ \sigma_Q = \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{S_{max}/R_c}{2^{n_b}} \end{array} \right. \quad (A.2)$$

where G is the system gain of the pre-amplification and the detector, λ is the wavelength, ζ (~ 1 or ~ 1.5 for photon-counting or analog detections, respectively) is a correction factor by taking into count the statistic gain fluctuation of the photo-detector, Δz is the vertical sampling resolution along the lidar line-of-sight, QE is the quantum efficiency of the photo-detector, NEP is Noise-equivalent power of the detector ($\sim 10^{-15} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ for a photomultiplier, $\sim 10^{-13} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ for an avalanche photodiode), T_K is the detector's temperature ($\sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$), n_b is the bit number for the quantification and S_{max} is the maximal amplitude of the quantification. The Planck constant, the light velocity, and the Boltzmann constant are h ($\sim 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), c ($3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), and k_B ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$), respectively.

In photon-counting detection mode, σ_{JN} is not involved and σ_D is negligible compared to photon numbers (σ_D is about 3.5×10^4 times smaller than σ_S for our airborne lidar system). The quantification noise based on 12 bits is negligible (and $\sigma_Q \sim 2.8 \times 10^{-7} \text{ A}$). The shot noise, whose standard deviation σ_S is proportional to the square root of the lidar signal, is the main source of noise, and was taken into account in our simulations. The expression of SNR for both photon-counting and analog detections can be derived from Equations (1), (A.1) and (A.2).

Appendix B: Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) Retrieval

Rahman *et al.* [78] developed a three-parameters nonlinear semi-empirical model of Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF), which is explained against the scattering phase function (P) as:

$$BRDF(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \frac{k_0 \cdot [\cos^{k_2-1}(\theta_v) \cdot \cos^{k_2-1}(\theta_s)]}{[\cos(\theta_s) + \cos(\theta_v)]^{1-k_2}} \cdot P(\gamma) \cdot [1 + R(\gamma)] \quad (B.1)$$

where

$$\left\{ \begin{array}{l} P(\gamma) = \frac{1 - k_1^2}{[1 + k_1^2 - 2 \cdot k_1 \cdot \cos(\gamma)]^{3/2}} \\ R(\gamma) = \frac{1 - k_0}{1 + \Delta} \end{array} \right. \quad (B.2)$$

with

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos(\pi - \gamma) = \cos(\theta_s) \cdot \cos(\theta_v) + \sin(\theta_s) \cdot \sin(\theta_v) \cdot \cos(\varphi) \\ \Delta(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \sqrt{tg^2(\theta_s) + tg^2(\theta_v) - 2 \cdot tg(\theta_s) \cdot tg(\theta_v) \cdot \cos(\varphi)} \end{array} \right. \quad (B.3)$$

The three coefficients k_0 , k_1 and k_2 were computed from observations performed for different sun-zenith (θ_s), view-zenith (θ_v) and relative-azimuth (ϕ) angles. The scattering angle (γ) is explained against them. This BRDF modeling is based on the product of three parts. The first one is a combination of the view- and sun-zenith angles derived from Minnaert [79]. The second one is the desired phase function P whereas the third one explicitly accounts for the hot spot [$1 + R(\gamma)$]. This model was tested on many data sets from airborne and spaceborne measurements performed with the Polarization and Directionality of the Earth Reflectance (POLDER) instrument [80,81]. As demonstrated by Bicheron and Leroy [82] and Maignan *et al.* [83], it is quite reliable on the bidirectional observations. The measurement-model difference is less than a few percent.

In order to assess P , the model was applied to the annual land-cover of the GLC2000 classification [84,85]. In the following, we only consider the land-covers of “*Mixed Forest*” and “*Evergreen Needle Leaf*” (for both the January and July periods) which are the more representative of our sampled sites. Hence, ~64 quasi-homogeneous samples of BRDF measured during the space mission PARASOL (Polarization & Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar) were considered for each case.

POLDER did not perform measurements at 355 nm (resp. 1064 nm), but the behavior of the 490 nm (resp. 865 nm) channel seems close to the one for the 355 nm (resp. 1064 nm) wavelength regarding the reflectance spectral dependency [50]. We thus consider the channels centered on 490 nm and 865 nm. Obviously, the pixel size of POLDER is much bigger than the spaceborne lidar footprint (e.g., 20 m in diameter) and the POLDER information is much more integrated. Nevertheless, this is the only spaceborne instrument making multidirectional measurements at the global scale.

The sampling sites of the GLC2000 reference database are not located in France because the POLDER pixel size (~6 km) is not compatible with the homogeneity of French forests. They are not exactly the same from one month to another since certain scenes could be cloudy [85]. An example of the cumulative probability density functions (CPDF) derived from the assessments of P is given in Figure B1 for the “*Mixed Forest*” at 490 nm and 865 nm. The RMS at 865 nm is smaller than the one at 490 nm, because of the less absorption of trees.

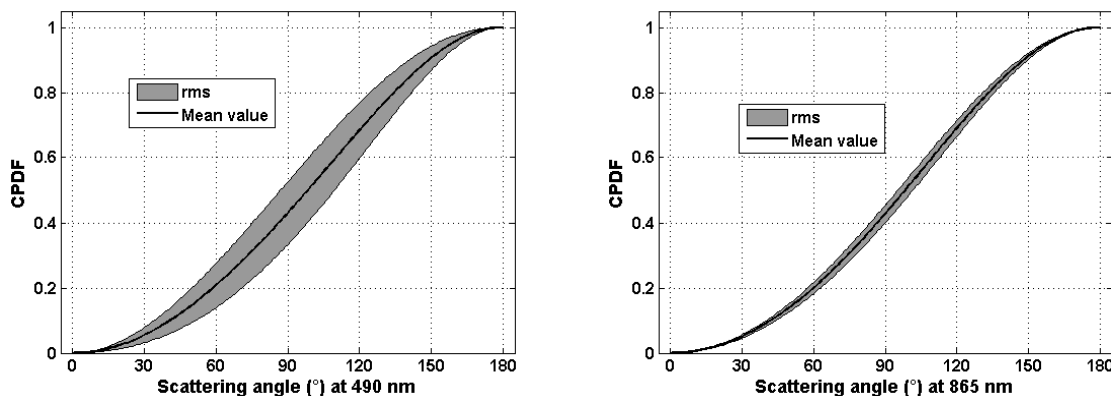


Figure B1. Cumulative probability density functions (CPDF) for the mixed forest at 490 or 865 nm, during July 2006. It was derived from the POLDER-3/PARASOL BRDFs databases. The gray areas highlight the standard deviation.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

1. Ciccioli, P.; Brancaleoni, E.; Frattoni, M.; di Palo, V.; Valentini, R.; Tirone, G.; Seufert, G.; Bertin, N.; Hansen, U.; Csiky, O.; *et al.* Emission of reactive terpene compounds from orange orchards and their removal by within-canopy processes. *J. Geophys. Res.* **1999**, *104*, 8077–8094.
2. Makar, P.A.; Fuentes, J.D.; Wang, D.; Staebler, R.M.; Wiebe, H.A. Chemical processing of biogenic hydrocarbons within and above a temperate deciduous forest. *J. Geophys. Res.* **1999**, *104*, 3581–3603.
3. Fuentes, J.D.; Gu, L.; Lerdau, M.; Atkinson, R.; Baldocchi, D.; Bottenheim, J.W.; Ciccioli, P.; Lamb, B.; Geron, C.; Guenther, A.; *et al.* Biogenic Hydrocarbons in the Atmospheric Boundary Layer: A Review. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **2000**, *81*, 1537–1575.
4. Forkel, R.; Klemm, O.; Graus, M.; Rappenglück, B.; Stockwell, W.R.; Grabmer, W.; Held, A.; Hansel, A.; Steinbrecher, R. Trace gas exchange and gas phase chemistry in a Norway spruce forest: A study with a coupled 1-dimensional canopy atmospheric chemistry emission model. *Atmos. Environ.* **2006**, *40*, 28–42.
5. Fowler, D.; Pilegaard, K.; Sutton, M.A.; Ambus, P.; Raivonen, M.; Duyzer, J.; Simpson, D.; Fagerli, H.; Fuzzi, S.; Schjoerring, J.K.; *et al.* Atmospheric composition change: Ecosystems-Atmosphere interactions. *Atmos. Environ.* **2009**, *43*, 5193–5267.
6. Tao, Z. A summer simulation of biogenic contributions to ground-level ozone over the continental United States. *J. Geophys. Res.* **2003**, *108*, 4404.
7. Thunis, P.; Cuvelier, C. Impact of biogenic emissions on ozone formation in the Mediterranean area—A BEMA modelling study. *Atmos. Environ.* **2000**, *34*, 467–481.
8. Tsigaridis, K.; Kanakidou, M. Global modelling of secondary organic aerosol in the troposphere: A sensitivity analysis. *Atmos. Chem. Phys.* **2003**, *3*, 1849–1869.
9. IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Available online: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Frontmatter_FINAL.pdf (accessed on 21 April 2015).
10. MacArthur, R.H.; MacArthur, J.W. On bird species diversity. *Ecology* **1961**, *42*, 594–598.
11. Hansen, A.J.; Rotella, J.J.; Kraska, M.P.V.; Brown, D. Spatial patterns of primary productivity in the Greater Yellowstone Ecosystem. *Landsc. Ecol.* **2000**, *15*, 505–522.
12. Hollinger, D.Y. Canopy Organization and Foliage Photosynthetic Capacity in a Broad-Leaved Evergreen Montane Forest. *Funct. Ecol.* **1989**, *3*, 53–62.
13. Brown, M.J.; Parker, G.G. Canopy light transmittance in a chronosequence of mixed-species deciduous forests. *Can. J. For. Res.* **1994**, *24*, 1694–1703.
14. Lefsky, M.A.; Cohen, W.B.; Acker, S.A.; Parker, G.G.; Spies, T.A.; Harding, D. Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests. *Remote Sens. Environ.* **1999**, *70*, 339–361.
15. Lefsky, M.A.; Harding, D.; Cohen, W.B.; Parker, G.; Shugart, H.H. Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA. *Remote Sens. Environ.* **1999**, *67*, 83–98.

16. Horn, H.S. *The Adaptive Geometry of Trees*; Princeton University Press: Princeton, NJ, USA, 1971; Volume 1971.
17. Hyde, P.; Dubayah, R.; Walker, W.; Blair, J.B.; Hofton, M.; Hunsaker, C. Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy. *Remote Sens. Environ.* **2006**, *102*, 63–73.
18. Toan, T.; Quegan, S.; Woodward, I.; Lomas, M.; Delbart, N.; Picard, G. Relating Radar Remote Sensing of Biomass to Modelling of Forest Carbon Budgets. *Clim. Chang.* **2004**, *67*, 379–402.
19. Balzter, H.; Rowland, C.S.; Saich, P. Forest canopy height and carbon estimation at Monks Wood National Nature Reserve, UK, using dual-wavelength SAR interferometry. *Remote Sens. Environ.* **2007**, *108*, 224–239.
20. Garestier, F.; Dubois-Fernandez, P.C.; Champion, I. Forest Height Inversion Using High-Resolution P-Band Pol-InSAR Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2008**, *46*, 3544–3559.
21. Hall, F.G.; Bergen, K.; Blair, J.B.; Dubayah, R.; Houghton, R.; Hurtt, G.; Kellndorfer, J.; Lefsky, M.; Ranson, J.; Saatchi, S.; *et al.* Characterizing 3D vegetation structure from space: Mission requirements. *Remote Sens. Environ.* **2011**, *115*, 2753–2775.
22. Ni-Meister, W.; Jupp, D.L.B.; Dubayah, R. Modeling lidar waveforms in heterogeneous and discrete canopies. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2001**, *39*, 1943–1958.
23. Gastellu-Etchegorry, J.-P.; Yin, T.; Lauret, N.; Cajgfinger, T.; Gregoire, T.; Grau, E.; Feret, J.-B.; Lopes, M.; Guilleux, J.; Dedieu, G.; *et al.* Discrete Anisotropic Radiative Transfer (DART 5) for Modeling Airborne and Satellite Spectroradiometer and LIDAR Acquisitions of Natural and Urban Landscapes. *Remote Sens.* **2015**, *7*, 1667–1701.
24. Montesano, P.M.; Rosette, J.; Sun, G.; North, P.; Nelson, R.F.; Dubayah, R.O.; Ranson, K.J.; Kharuk, V. The uncertainty of biomass estimates from modeled ICESat-2 returns across a boreal forest gradient. *Remote Sens. Environ.* **2015**, *158*, 95–109.
25. Cuesta, J.; Chazette, P.; Allouis, T.; Flamant, P.H.; Durrieu, S.; Sanak, J.; Genau, P.; Guyon, D.; Loustau, D.; Flamant, C. Observing the forest canopy with a new ultra-violet compact airborne lidar. *Sensors* **2010**, *10*, 7386–7403.
26. Boudreau, J.; Nelson, R.F.; Margolis, H.A.; Beaudoin, A.; Guindon, L.; Kimes, D.S. Regional aboveground forest biomass using airborne and spaceborne LiDAR in Québec. *Remote Sens. Environ.* **2008**, *112*, 3876–3890.
27. Dubayah, R.O.; Drake, J.B. Lidar remote sensing for forestry. *J. For.* **2000**, *98*, 44–46.
28. Reutebuch, S.E.; Andersen, H.; Mcgaughey, R.J.; Forest, L. Light detection and ranging (LIDAR): an emerging tool for multiple resource inventory. *J. For.* **2005**, 286–292.
29. Berthier, S.; Chazette, P.; Couvert, P.; Pelon, J.; Dulac, F.; Thieuleux, F.; Moulin, C.; Pain, T. Desert dust aerosol columnar properties over ocean and continental Africa from Lidar in-Space Technology Experiment (LITE) and Meteosat synergy. *J. Geophys. Res.* **2006**, *111*, D21202.
30. Winker, D.M.; Hunt, W.H.; McGill, M.J. Initial performance assessment of CALIOP. *Geophys. Res. Lett.* **2007**, *34*, doi:10.1029/2007GL030135
31. Chazette, P.; Raut, J.-C.; Dulac, F.; Berthier, S.; Kim, S.-W.; Royer, P.; Sanak, J.; Loaëc, S.; Grigaut-Desbrosses, H. Simultaneous observations of lower tropospheric continental aerosols with a ground-based, an airborne, and the spaceborne CALIOP lidar system. *J. Geophys. Res.* **2010**, *115*, doi:10.1029/2009JD012341.

32. Schutz, B.E.; Zwally, H.J.; Shuman, C.A.; Hancock, D.; DiMarzio, J.P. Overview of the ICESat Mission. *Geophys. Res. Lett.* **2005**, *32*, doi:10.1029/2005GL024009
33. Murooka, J.; Kobayashi, T.; Imai, T.; Suzuki, K.; Sakaizawa, D.; Yamakawa, S.; Sato, R.; Sawada, H.; Asai, K. Overview of Japan's spaceborne vegetation lidar mission. *Proc. SPIE* **2013**, *8894*, doi:10.1117/12.2029119.
34. Krainak, M.A.; Abshire, J.B.; Camp, J.; Chen, J.R.; Coyle, B.; Li, S.X.; Numata, K.; Riris, H.; Stephen, M.A.; Stysley, P.; *et al.* Laser transceivers for future NASA missions. *Proc. SPIE* **2012**, *8381*, doi:10.1117/12.920783.
35. Blair, J.B.; Rabine, D.L.; Hofton, M.A. The Laser Vegetation Imaging Sensor: A medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **1999**, *54*, 115–122.
36. Drake, J.B.; Dubayah, R.O.; Knox, R.G.; Clark, D.B.; Blair, J.B. Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. *Remote Sens. Environ.* **2002**, *81*, 378–392.
37. Means, J.E.; Acker, S.A.; Harding, D.J.; Blair, J.B.; Lefsky, M.A.; Cohen, W.B.; Harmon, M.E.; McKee, W.A. Use of large-footprint scanning airborne Lidar to estimate forest stand characteristics in the western cascades of Oregon. *Remote Sens. Environ.* **1999**, *67*, 298–308.
38. Nelson, R.; Parker, G.; Hom, M. A Portable Airborne Laser System for Forest Inventory. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* **2003**, *69*, 267–273.
39. Nelson, R.; Short, A.; Valenti, M. Measuring biomass and carbon in delaware using an airborne profiling LIDAR. *Scand. J. For. Res.* **2004**, *19*, 500–511.
40. Blair, J.B.; Hofton, M.A. Modeling laser altimeter return waveforms over complex vegetation using high-resolution elevation data. *Geophys. Res. Lett.* **1999**, *26*, 2509–2512.
41. Chazette, P.; Sanak, J.; Dulac, F. New approach for aerosol profiling with a lidar onboard an ultralight aircraft: application to the African Monsoon Multidisciplinary Analysis. *Environ. Sci. Technol.* **2007**, *41*, 8335–8341.
42. Shang, X.; Chazette, P. Interest of a full-waveform flown UV lidar to derive forest vertical structures and aboveground carbon. *Forests* **2014**, *5*, 1454–1480.
43. Chazette, P.; Pelon, J.; Mégie, G. Determination by spaceborne backscatter lidar of the structural parameters of atmospheric scattering layers. *Appl. Opt.* **2001**, *40*, 3428–3440.
44. Measures, R.M. *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*; Wiley, J., Ed.; Krieger Publishing Company: Malabar, Florida, USA, 1984.
45. Hofton, M.A.; Minster, J.B.; Blair, J.B. Decomposition of laser altimeter waveforms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2000**, *38*, 1989–1996.
46. MODIS Data Products. Available online: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/index.php> (accessed on 21 April 2015).
47. Ångström, A. The parameters of atmospheric turbidity. *Tellus A* **1964**, *16*, 64–75.
48. Tang, H.; Dubayah, R.; Swatantran, A.; Hofton, M.; Sheldon, S.; Clark, D.B.; Blair, B. Retrieval of vertical LAI profiles over tropical rain forests using waveform lidar at La Selva, Costa Rica. *Remote Sens. Environ.* **2012**, *124*, 242–250.
49. Chen, J.M.; Rich, P.M.; Gower, S.T.; Norman, J.M.; Plummer, S. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. *J. Geophys. Res.* **1997**, *102*, 29429–29443.

50. Bendix, J.; Silva, B.; Roos, K.; Göttlischer, D.O.; Rollenbeck, R.; Nauss, T.; Beck, E. Model parameterization to simulate and compare the PAR absorption potential of two competing plant species. *Int. J. Biometeorol.* **2010**, *54*, 283–295.
51. MODIS Data Products Table. Available online: https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table (accessed on 21 April 2015).
52. Zwally, H.J.; Schutz, B.; Abdalati, W.; Abshire, J.; Bentley, C.; Brenner, A.; Bufton, J.; Dezio, J.; Hancock, D.; Harding, D.; *et al.* ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land. *J. Geodyn.* **2002**, *34*, 405–445.
53. Kiemle, C.; Quatrevalet, M.; Ehret, G.; Amediek, A.; Fix, A.; Wirth, M. Sensitivity studies for a space-based methane lidar mission. *Atmos. Meas. Tech.* **2011**, *4*, 2195–2211.
54. Stoffelen, A.; Pailleux, J.; Källén, E.; Vaughan, J.M.; Isaksen, I.; Flamant, P.; Wergen, W.; Andersson, E.; Schyberg, H.; Culoma, A.; *et al.* The atmospheric dynamics mission for global wind field measurement. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **2005**, *86*, 73–87.
55. Winker, D.M.; Pelon, J.; McCormick, M.P.; Pierre, U.; Jussieu, P. The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds. *Proc. SPIE* **2003**, *4893*, 1–11.
56. Cloud-Aerosol Transport System (CATS). Available online: <http://cats.gsfc.nasa.gov/> (accessed on 21 April 2015).
57. Palm, S.; Hart, W.; Hlavka, D.; Welton, E.J.; Spinhirne, J. Geoscience Laser Altimeter System (Glas) Atmospheric Data Products. Available online: http://www.csr.utexas.edu/glas/pdf/atbd_atmos.pdf (accessed on 21 April 2015).
58. Spinhirne, J.D.; Palm, S.P.; Hlavka, D.L.; Hart, W.D.; Welton, E.J. Global aerosol distribution from the GLAS polar orbiting lidar instrument. In Proceedings of IEEE Workshop on Remote Sensing of Atmospheric Aerosols, 2005, Tucson, AZ, USA, 5–6 April 2005; pp. 2–8.
59. Andersson, E.; Dabas, A.; Endemann, M.; Ingmann, P.; Källén, E.; Offiler, D.; Stoffelen, A. *ADM-AEOLUS: Science Report*; Clissold, P., Ed.; ESA Communication Production Office: Noordwijk, The Netherlands, 2008.
60. CALIOP Algorithm Theoretical Basis Document. Available online: http://www.researchgate.net/publication/238679106_CALIOP_Algorithm_Theoretical_Basis_Document_Part_1__CALIOP_Instrument_and_Algorithms_Overview (accessed on 23 April 2015).
61. EUFORGEN. Available online: <http://www.euforgen.org/> (accessed on 21 April 2015).
62. Strasberg, D.; Rouget, M.; Richardson, D.M.; Baret, S.; Dupont, J.; Cowling, R.M. An Assessment of Habitat Diversity and Transformation on La Réunion Island (Mascarene Islands, Indian Ocean) as a Basis for Identifying Broad-scale Conservation Priorities. *Biodivers. Conserv.* **2005**, *14*, 3015–3032.
63. Nicolet, M. On the molecular scattering in the terrestrial atmosphere: An empirical formula for its calculation in the homosphere. *Planet. Space Sci.* **1984**, *32*, 1467–1468.
64. Chazette, P.; Marnas, F.; Totems, J. The mobile water vapor aerosol raman lidar and its implication in the framework of the HyMeX and ChArMEx programs: Application to a dust transport process. *Atmos. Meas. Tech.* **2014**, *7*, 1629–1647.
65. Yang, W.; Ni-Meister, W.; Lee, S. Assessment of the impacts of surface topography, off-nadir pointing and vegetation structure on vegetation lidar waveforms using an extended geometric optical and radiative transfer model. *Remote Sens. Environ.* **2011**, *115*, 2810–2822.

66. Hancock, S.; Lewis, P.; Foster, M.; Disney, M.; Muller, J.-P. Measuring forests with dual wavelength lidar: A simulation study over topography. *Agric. For. Meteorol.* **2012**, *161*, 123–133.
67. Kotchenova, S.Y. Modeling lidar waveforms with time-dependent stochastic radiative transfer theory for remote estimations of forest structure. *J. Geophys. Res.* **2003**, *108*, doi:10.1029/2002JD003288.
68. Nelson, R.; Boudreau, J.; Gregoire, T.G.; Margolis, H.; Næsset, E.; Gobakken, T.; Ståhl, G. Estimating Quebec provincial forest resources using ICESat/GLAS. *Can. J. For. Res.* **2009**, *39*, 862–881.
69. Hayashi, M.; Saigusa, N.; Oguma, H.; Yamagata, Y. Forest canopy height estimation using ICESat/GLAS data and error factor analysis in Hokkaido, Japan. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **2013**, *81*, 12–18.
70. Lefsky, M.A.; Harding, D.J.; Keller, M.; Cohen, W.B.; Carabajal, C.C.; Del Bom Espirito-Santo, F.; Hunter, M.O.; de Oliveira, R. Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. *Geophys. Res. Lett.* **2005**, *32*, doi:10.1029/2005GL023971.
71. ONF. Available online: <http://www.onf.fr/> (accessed on 21 April 2015).
72. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Available online: <http://www.ecmwf.int/> (accessed on 21 April 2015).
73. Ballhorn, U.; Jubanski, J.; Siegert, F. ICESat/GLAS Data as a Measurement Tool for Peatland Topography and Peat Swamp Forest Biomass in Kalimantan, Indonesia. *Remote Sens.* **2011**, *3*, 1957–1982.
74. Lee, S.; Ni-Meister, W.; Yang, W.; Chen, Q. Physically based vertical vegetation structure retrieval from ICESat data: Validation using LVIS in White Mountain National Forest, New Hampshire, USA. *Remote Sens. Environ.* **2011**, *115*, 2776–2785.
75. Iqbal, I.A.; Dash, J.; Ullah, S.; Ahmad, G. A novel approach to estimate canopy height using ICESat/GLAS data: A case study in the New Forest National Park, UK. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **2013**, *23*, 109–118.
76. ESA. Available online: <http://www.esa.int> (accessed on 21 April 2015).
77. Kotchenova, S.Y.; Vermote, E.F.; Matarrese, R.; Klemm, F.J., Jr. Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: Path radiance. *Appl. Opt.* **2006**, *45*, 6762–6744.
78. Rahman, H.; Pinty, B.; Verstraete, M.M. Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model: 2. Semiempirical surface model usable with NOAA advanced very high resolution radiometer data. *J. Geophys. Res.* **1993**, *98*, doi:10.1029/93JD02072.
79. Minnaert, M. The reciprocity principle in lunar photometry. *Astrophys. J.* **1941**, *93*, 403–410.
80. Leroy, M.; Deuzé, J.L.; Bréon, F.M.; Hautecoeur, O.; Herman, M.; Buriez, J.C.; Tanré, D.; Bouffières, S.; Chazette, P.; Roujean, J.L. Retrieval of atmospheric properties and surface bidirectional reflectances over land from POLDER/ADEOS. *J. Geophys. Res.* **1997**, *102*, 17023–17037.
81. Bréon, F.-M. Analysis of hot spot directional signatures measured from space. *J. Geophys. Res.* **2002**, *107*, doi:10.1029/2001JD001094
82. Bicheron, P.; Leroy, M. Bidirectional reflectance distribution function signatures of major biomes observed from space. *J. Geophys. Res.* **2000**, *105*, doi:10.1029/2000JD900380.

83. Maignan, F.; Bréon, F.M.; Lacaze, R. Bidirectional reflectance of Earth targets: Evaluation of analytical models using a large set of spaceborne measurements with emphasis on the Hot Spot. *Remote Sens. Environ.* **2004**, *90*, 210–220.
84. Bacour, C.; Bréon, F.M.; Maignan, F. Normalization of the directional effects in NOAA-AVHRR reflectance measurements for an improved monitoring of vegetation cycles. *Remote Sens. Environ.* **2006**, *102*, 402–413.
85. Lacaze, R.; Fédèle, E.; Bréon, F.-M. POLDER-3/PARASOL BRDF Databases User Manual. Available online: http://web.gps.caltech.edu/~vijay/pdf/POLDER-3_BRDF_UserManual-I1.10.pdf (accessed on 21 April 2015).

© 2015 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

5.3. Compléments d'étude

Dans cette section vont être présentés des compléments à l'article précédent, principalement sur les effets de distorsion lié à la pente et à la diffusion multiple. On discutera quelques résultats récents qui suivent l'utilisation du simulateur pour des profils lidar obtenus sur les forêts tropicales de La Réunion.

5.3.1. Erreur relative sur l'effet de la pente

Nous avons vu que les erreurs relatives sur les 3 paramètres forestiers (TTH, QMCH, FOT) varient en fonction de la pente ou du diamètre de l'empreinte du laser sur le sol (Figure 5.1). Les erreurs sur la hauteur d'arbre (TTH) augmentent avec la pente ou la taille de l'empreinte, mais les erreurs sur la hauteur quadratique moyenne (QMCH) ou l'épaisseur optique de la forêt (FOT) n'augmentent pas de façon monotone. Il y a en effet une compensation des mauvaises détections de l'écho du sol et de la hauteur de la canopée. Si on prend l'exemple d'une pente de 30° avec une empreinte laser au sol de 20 m en diamètre, il y aura une erreur de 10-30% sur les paramètres restitués. Cette simulation a pris en considération une distribution d'arbres comme celle illustrée sur la partie gauche de la Figure 5.2. Cependant, les distributions d'arbres peuvent également ressembler à celle de l'illustration de droite de la Figure 5.2. En fonction de l'orientation de la pente et de l'importance de son angle d'inclinaison, les arbres situés en bas de la pente peuvent pousser plus pour avoir plus de lumière. Un exemple de cet effet est donné par une photo sur un site forestier de la forêt de Fontainebleau (Figure 5.3). Par conséquent, il peut y avoir un peu moins d'erreurs à cause de l'effet de la pente pour la détection du sommet de la canopée. La détection de l'écho de sol sera toujours entachée de la même incertitude, et la compensation d'erreur sera moindre.

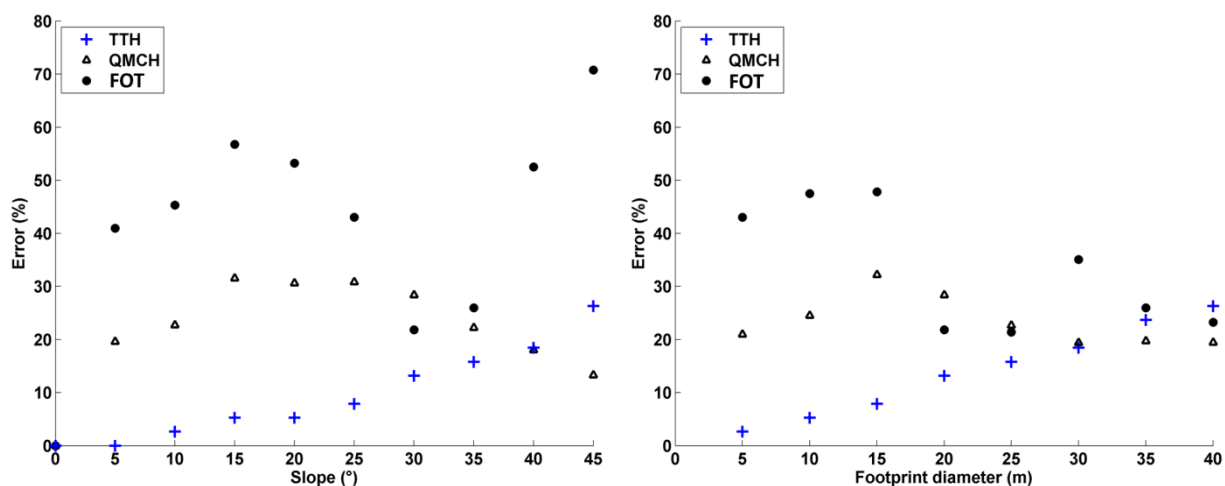


Figure 5.1. Erreurs relatives sur la TTH (hauteur d'arbre, en croix bleu), la QMCH (hauteur quadratique moyenne, en triangle noir), et la FOT (Epaisseur optique de la forêt, en point noir) en fonction de la pente sur la figure de gauche avec la même taille d'empreinte de 20 m, et en fonction du diamètre de l'empreinte laser au sol sur la figure de droite avec la même pente de 30° .

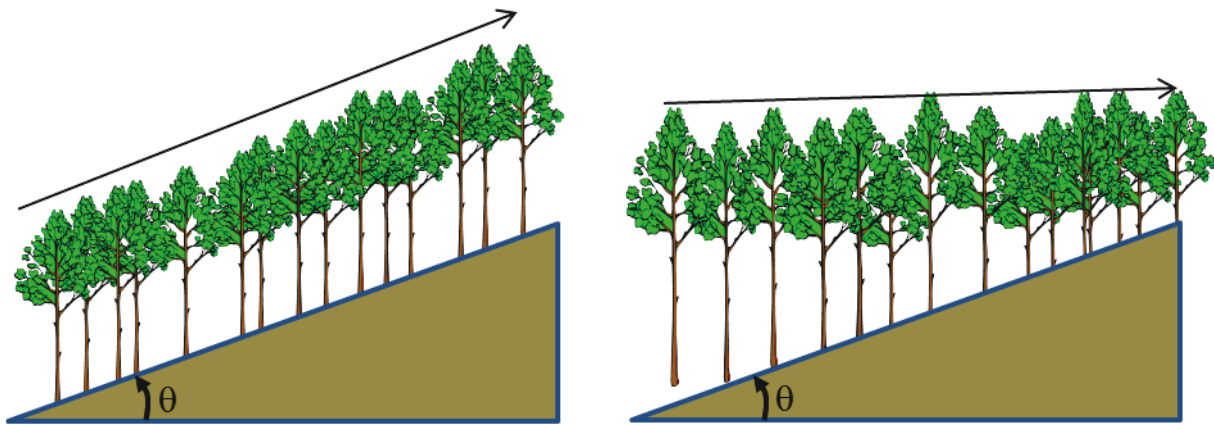


Figure 5.2. Illustrations des distributions possibles d'arbres sur une pente.

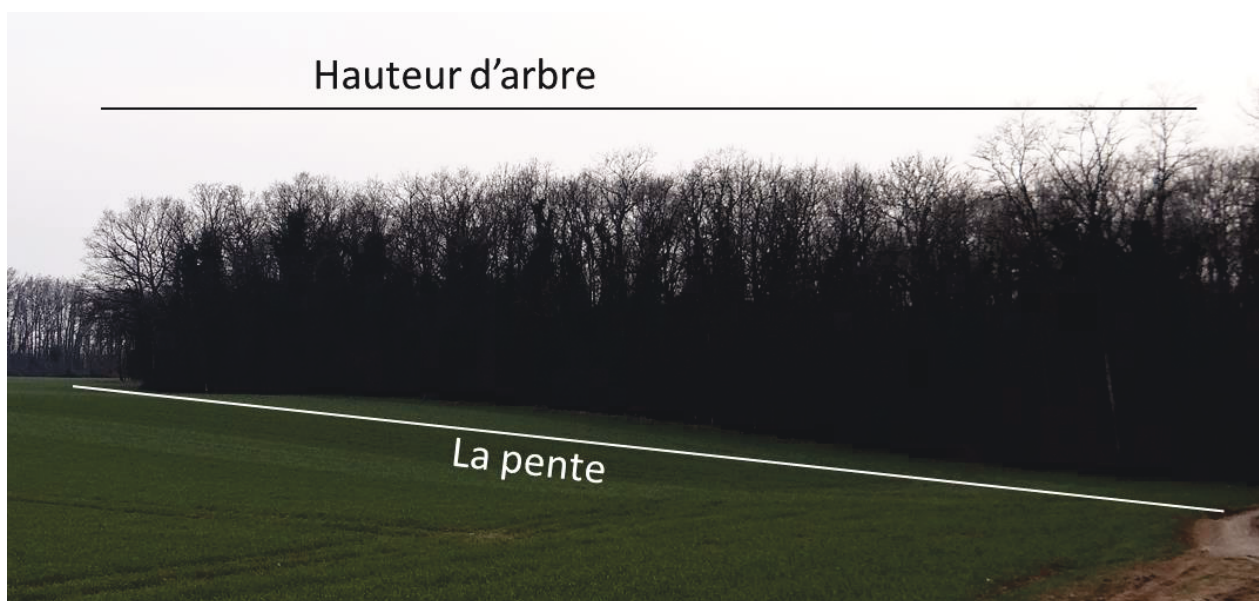


Figure 5.3. Photo d'un site forestier dans la forêt de Fontainebleau. Prise de vue du 39/03/2013 durant la campagne de terrain.

5.3.2. Diffusion multiple

Dans l'article, à la section 5.2, la probabilité de diffusion de la lumière laser a été calculée à partir des BRDFs (Bidirectional Reflectance Distribution Functions) de POLDER / PARASOL (Polarization and Directionality of the Earth Reflectance / Polarization & Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar). Une autre étude a été conduite en considérant des surfaces végétales lambertiennes. Un exemple de simulation est donné sur la Figure 5.4 pour les 2 cas. Les incertitudes relatives sur la hauteur quadratique moyenne (QMCH) est de 4.4% en utilisant les BRDF de PARASOL et 6.2% en utilisant une diffusion lambertienne. De la même manière, ces erreurs sont de 5.7% et 9% pour l'épaisseur optique de la forêt (FOT). On a donc une différence significative entre ces deux approches, c'est ce qui nous a conduit à utiliser les BRDF PARASOL pour nos simulations finales présentées dans l'article de la section 5.2.

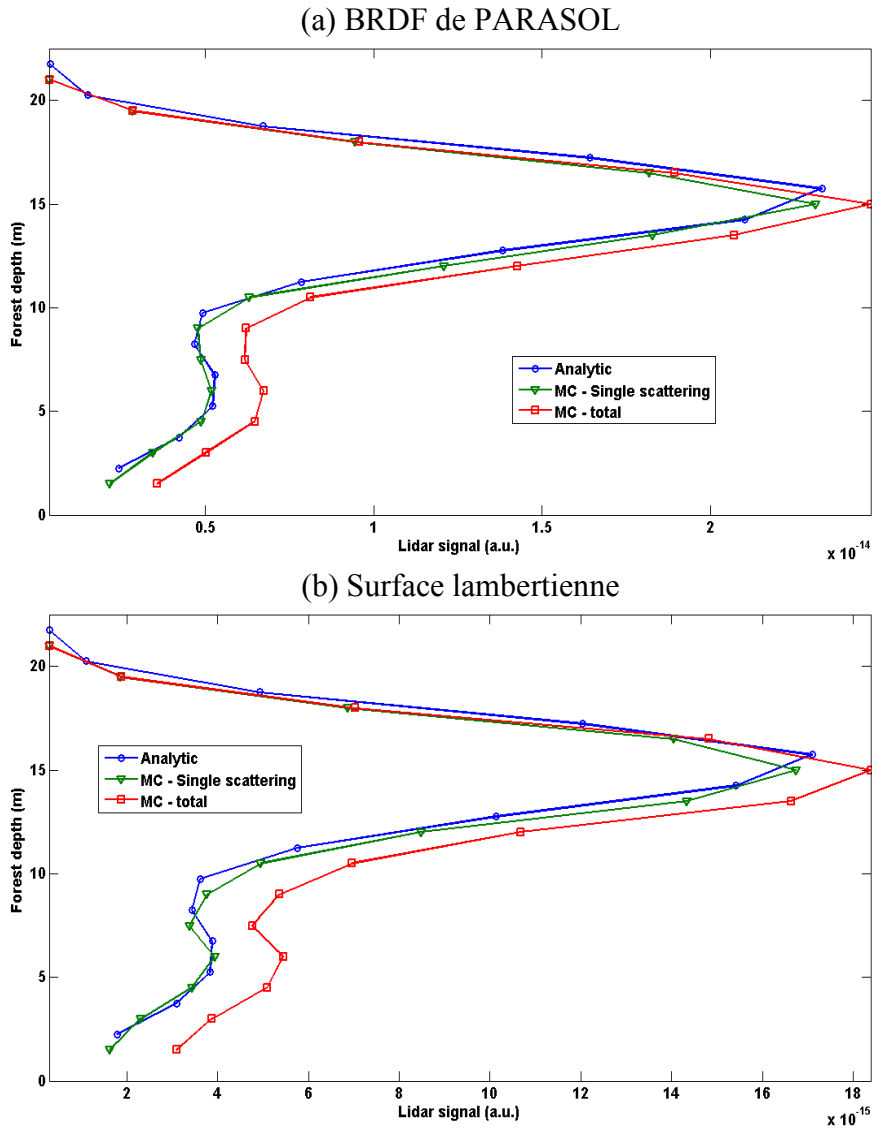


Figure 5.4. Simulation de Monte Carlo de profil lidar à la longueur d'onde de 865 nm, en utilisant une indicatrice de diffusion (a) déduite des BRDF de PARASOL, et (b) lambertienne. Bleu : profil analytique, Vert : profil simulé ne prenant en compte que la diffusion simple, Rouge : profil simulé prenant en compte la diffusion multiple.

5.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des bilans de liaison pour un système lidar 355 nm aéroporté et pour un système lidar à 355 et 1064 nm embarqué sur plateforme spatiale dédiés aux études des forêts des échelles régionale à globale. Ces calculs ont été effectués à partir d'un simulateur dit « end-to-end » qui a été initialisé par les mesures lidar aéroportées acquises lors de campagnes utilisant un système lidar UV (355 nm) aéroporté. Les paramètres critiques du système lidar ont ainsi été étudiés. La taille d'empreinte du laser au sol doit être au moins de 20 m en diamètre afin d'assurer une bonne détection de l'écho du sol (probabilité > 0.95). Avec une telle taille de l'empreinte, les effets de la pente et de la diffusion multiples dans l'infrarouge (e.g. 1064 nm) doivent être pris en compte. Nous avons montré que le rapport signal sur bruit (SNR) doit être supérieur à 10 pour extraire des paramètres forestiers

avec des incertitudes acceptables. Les énergies d'émission nécessaires du laser pour avoir ce SNR optimal ont été évaluées pour un système lidar embarqué sur plateforme spatiale et gravitant sur différentes orbites.

Un système lidar ultraviolet, s'il est bien adapté pour les mesures aéroportées avec l'avantage d'une très faible diffusion multiple dans les forêts, n'est pas optimal pour une mission spatiale. Ceci est principalement lié à la forte valeur de la transmission atmosphérique et à la faible diffusion de la végétation à cette longueur d'onde. Il est donc préférable de favoriser une longueur d'onde dans le proche infrarouge. Il est alors possible d'envisager différentes altitudes d'orbites, mais les orbites basses et moyennes sont préférables pour les forêts denses comme les forêts tropicales. Les orbites comme celle de la mission CALIPSO permettent plutôt de sonder les forêts de moyenne latitude, ou même boréales car elles sont généralement moins denses que les tropicales. Il faut néanmoins bien tenir compte de la saison car, par exemple, les forêts de chêne en été resteront difficiles à traverser car elles peuvent présenter des épaisseurs optiques largement supérieures à 2. Il sera préférable de sonder ce type de forêt en hiver quand les feuilles sont tombées. Maintenant, la probabilité de présence des nuages est également plus forte en hiver. Il y a donc de nombreux compromis à trouver pour une mission spatiale lidar dédiée à l'observation des forêts, ces compromis sont fonction des objectifs scientifiques que l'on se fixe. Ils devront tenir compte des capacités des modèles de végétation qui seront, à termes, capables d'assimiler les données structurales des forêts retrouvées à partir de la télédétection active lidar.



Conclusion générale et Perspective

6.1. Conclusion

Un des grands enjeux scientifique et technique pour faire face aux retombées des activités humaines sur le climat est d'apporter un moyen performant d'observation des environnements forestiers à l'échelle de la planète. Afin d'apporter une réponse sociétale, ces observations devront, à termes, intégrer un outil d'aide à la décision. Il permettra d'optimiser la gestion forestière et d'aider à lutter contre la déforestation, tout comme au suivi du reboisement dans une vision de développement durable. On devrait ainsi améliorer notre connaissance des flux de carbone entre l'atmosphère et la forêt en s'appuyant sur un suivi interannuel de l'évolution des environnements forestiers à l'échelle globale. Mon travail de thèse a permis de conduire les premières études en France permettant la construction d'un démonstrateur lidar dédié à l'observation spatiale. Une approche semi-empirique a ainsi été conduite, qui utilise un couplage entre les mesures aéroportées acquises durant différentes campagnes ciblées et la modélisation numérique.

Le système lidar ultraviolet (« ULICE », Ultraviolet Lidar for Canopy Experiment) a été embarqué sur un avion avec différentes configurations instrumentales. Il a offert la possibilité d'échantillonner des sites forestiers variés du territoire français, des forêts de moyenne latitude (résineux et feuillus) jusqu'aux forêts tropicales primaires. Les méthodes inverses que j'ai développées ont été utilisées afin de déduire les paramètres structuraux et optiques importants à la caractérisation des couverts forestiers à partir des mesures lidar aéroportées :

- Les hauteurs d'arbres et les structures internes ont été restituées. Le système lidar ULICE a montré sa capacité afin de bien échantillonner les sites forestiers, même pour une forêt tropicale sauvage comme celle de Bélouve sur l'île de La Réunion. Comparativement aux observations au sol, qui nécessitent un important investissement humain sur le terrain, les mesures lidar permettent de très bien restituer les hauteurs d'arbres, et les dispersions associées, avec une

précision de l'ordre du mètre. Elles sont également performantes afin de classifier les couverts forestiers comme cela a été montré en utilisant une approche par décomposition du signal lidar sur une base de modes gaussiens.

- Une relation biunivoque reliant la hauteur quadratique moyenne retrouvée à partir des mesures lidar et la biomasse a été estimée. Elle utilise comme contrainte des observations *in situ* sur un site forestier proche de Fontainebleaux. Ceci permet d'envisager une évaluation de la quantité de biomasse aérienne à partir des mesures lidar (Shang and Chazette, 2014) avec des précision estimées sur des chênes de l'ordre de 16 tC/ha. Un résultat important est également la mise en évidence d'une relation linéaire entre la hauteur quadratique moyenne pour la même parcelle forestière de chênes avec et sans feuille.
- L'épaisseur optique de la forêt (FOT), qui est une nouvelle notion proposée durant ma thèse, permet d'estimer le LAI (Leaf Area Index). J'ai pu trouver une relation linéaire entre la FOT et le LAI dérivé des observations MODIS au-dessus de la forêt des Landes. Ce paramètre optique pourrait être un paramètre plus facilement intégrable dans les modèles de biosphère, il pourrait même y être assimilé.
- Le profil lidar d'extinction restitué est directement relié à la structure verticale de la canopée forestière. Il permet de mieux comprendre les distributions des hauteurs d'arbre de la forêt, surtout pour les forêts très denses comme les forêts tropicales.

Mon travail inclut des études complètes de l'influence des sources d'incertitudes liées à la physique de la mesure et aux hypothèses de travail. Ce type d'études détaillées n'était pas complète dans la littérature spécialisée comme l'a souligné (Zolkos et al., 2013).

Partant de l'ensemble des observations lidar conduites durant ma thèse sur différents milieux forestier, j'ai été en mesure d'apporter les contraintes nécessaires pour l'établissement d'un simulateur lidar. Ce simulateur qui utilise en couplage un modèle direct de la mesure et un modèle inverse a été appelé modèle numérique « end-to-end ». Il m'a permis l'établissement de plusieurs résultats associés au bilan d'erreur. La taille d'empreinte du laser au sol a ainsi été établie comme devant être de l'ordre de 20 m en diamètre afin d'assurer une bonne détection de l'écho du sol tout en limitant les effets de pente. Néanmoins, ceux-ci ne restent pas négligeables sur les pentes dépassant 10°, et la diffusion multiple dans le couvert doit être considérée quand on travaille dans l'infrarouge proche (e.g. 1064 nm). Pour des orbitographies plausibles, le rapport signal sur bruit optimal et l'énergie d'émission du laser associée ont été évalués pour extraire les paramètres forestiers avec des incertitudes relatives inférieures à 10%. Les études de bilan de liaison ont été conduites pour un système lidar aéroporté émettant à 355 nm et pour un système lidar émettant à 355 et 1064 nm embarqué sur plateforme spatiale. Il est rapidement apparu qu'il était préférable de favoriser la longueur d'onde dans le proche infrarouge et qu'une mission devant échantillonner les forêts tropicales devait utiliser une énergie supérieure à 100 mJ, ceci pour une orbite similaire à celle de la station internationale, et un diamètre de télescope de 1 m.

6.2. Perspectives

Mon travail ouvre sur de nombreuses perspectives dont les principales sont présentées ci-dessous. Elles vont d'amélioration sur l'instrumentation à l'assimilation, en passant par la synergie instrumentale.

6.2.1. Intérêt d'un lidar multi-voies

6.2.1.1. Multi-voies de réception avec différentes densités optiques

Durant nos expériences, nous avons constaté que le signal lidar peut être saturé à cause de canopées très denses (forêts de feuillus en été ou tropicales). Ceci rend le profil difficile à utiliser en créant de fausse information (e.g. undershot, signal négatif, etc.). On peut diminuer l'énergie émise pour résoudre ce problème, mais ceci est suivi par une réduction du rapport signal sur bruit. Une solution est d'avoir 2, ou plus, voies de réception équipées de densités optiques de différentes valeurs. La voie avec une densité optique faible nous aide à localiser le sol, et la voie avec une densité optique forte nous donne des informations sur la canopée.

6.2.1.2. Multi-voies avec multi-longueurs d'onde

Nous avons trouvé que le proche infrarouge (1064 nm) est préférable pour un système lidar embarqué sur un satellite. Ceci est surtout contraint par la transmission atmosphérique comme le montre sur la Figure 6.1. De plus, la végétation possède dans ce domaine une transmittance et une réflectance importantes (Figure 6.2). Mais en même temps, ces longueurs d'onde sont fortement diffusées par la végétation, ce qui conduit à des processus de diffusion multiple importants. C'est pour quoi l'ultraviolet est un bon candidat pour un système lidar aéroporté. Un système lidar multi-longueurs d'onde est donc très intéressant pour étudier la forêt. En fait, les réflectances spectrales des diverses surfaces sont très différentes (Figure 6.3a), et ceci reste vrai pour les surfaces végétales. La Figure 6.3b donne des exemples de réflectance spectrale en fonction du type de végétation. En comparant les ratios des réflectance pour plusieurs longueurs d'onde, une classification en fonction du type de couvert peut être faite, comme c'est le cas en télédétection passive. En plus, cet aspect peut être aussi utilisé pour séparer les contribution des troncs et des feuilles (e.g. Li et al., 2014).

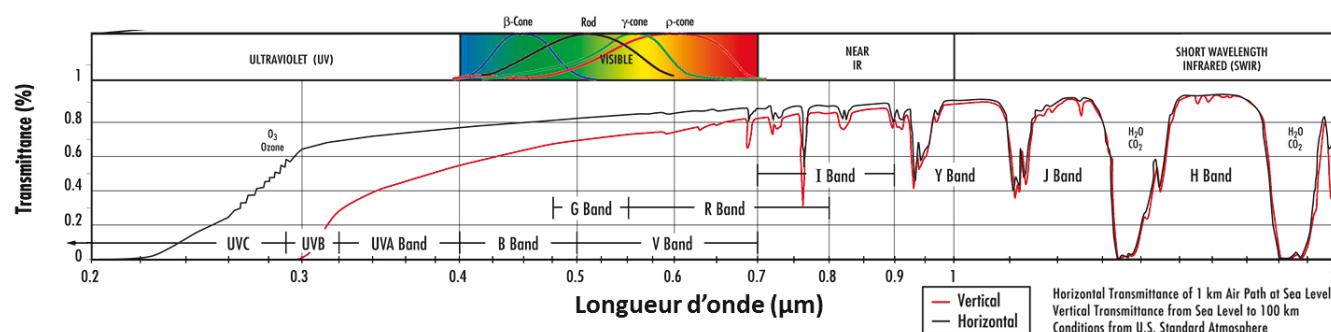


Figure 6.1. Transmission atmosphérique en fonction de longueur d'onde. Source Raytheon Company™ (<http://www.randfoo.com/wp-content/uploads/2010/01/The-IR-Wall-Chart.pdf>).

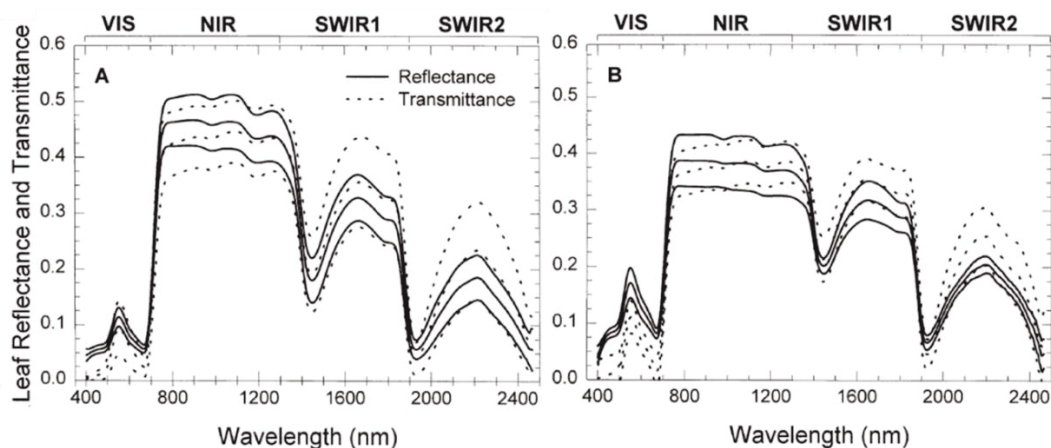


Figure 6.2. Réflectance (traits) et transmittance (pointillé) hémisphériques de feuille pour : A- Espèces ligneuses, B- Espèces herbacées. Source (Asner, 1998).

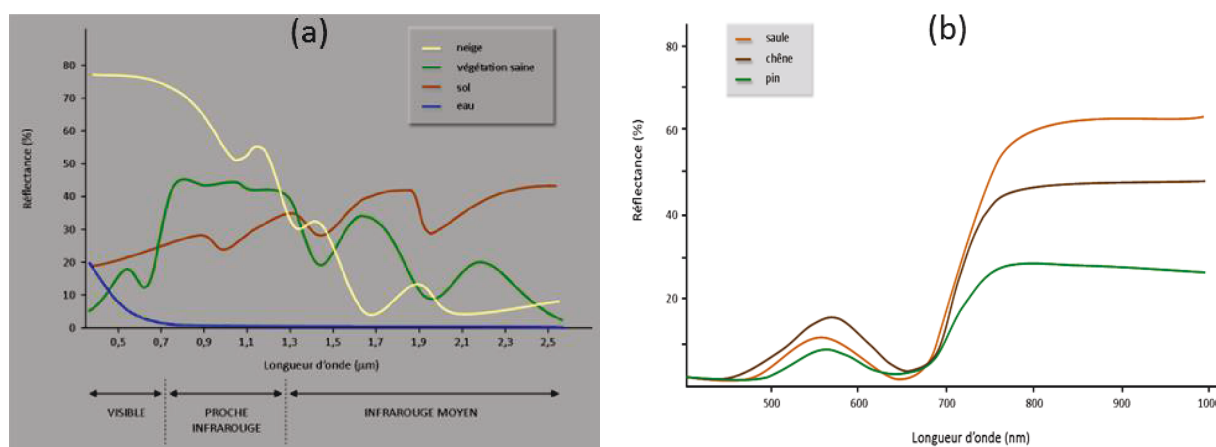


Figure 6.3. (a) Réflectance spectrale de la neige (jeune), de la végétation saine (vert), du sol nu (rouge) et de l'eau (bleu). (b) Réflectance spectrale en fonction du type de végétation (saule – orange, chêne – rouge, pin – vert). Source : ENVCAL (<http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/#A>).

6.2.2. Synergie instrumentale

La télédétection active lidar a un grand potentiel pour la mesure directe et l'estimation indirecte de plusieurs paramètres caractéristiques de la forêt (Tableau 6.1). Dans le chapitre 3, nous avons montré des exemples de l'extraction directe (e.g. la hauteur d'arbre), et de l'estimation indirecte (e.g. la biomasse aérienne et le Leaf Area Index) à partir des mesures lidar. L'estimation indirecte nécessite d'autres mesures (e.g. mesures *in situ* ou autres capteurs passifs/actifs) pour une calibration. C'est intéressant de coupler la mesure lidar à celle d'un capteur hyperspectral pour faire le lien entre le NDVI et les propriétés optiques de la forêt, comme lors de l'expérience conduite sur les forêts tropicales de La Réunion (chapitre 4). Il faudra, pour la suite, étudier la relation entre le NDVI et l'épaisseur optique de la forêt (FOT) dérivée des mesures lidar, celle-ci étant directement liée au LAI.

Une autre synergie, qui n'exclue pas la précédente, est celle avec un système radar. Le système radar présente l'avantage de permettre un balayage et il est plutôt sensible au volume de la forêt. La réflectivité radar peut donc être directement étalonnée en termes de biomasse aérienne. Des méthodes tomographiques (Dinh et al., 2014), comme celles étudiées pour le radar en bande P du programme BIOMASSE sélectionné par l'ESA, permettent également de remonter à la hauteur de la canopée si elle est suffisamment élevée. Néanmoins, pour la détermination des structures verticales, le lidar reste

l'instrument idéal. On voit donc ici tout l'intérêt de ce type de synergie qui a par ailleurs déjà bien fait ses preuves pour l'étude des nuages suite aux missions CALIPSO et CLOUDSAT incluses dans l'ATRAN (Stein et al., 2011).

Forest Characteristic	Lidar Derivation
Canopy Height	Direct retrieval
Subcanopy Topography	Direct retrieval
Vertical distribution of intercepted Surfaces	Direct retrieval
Aboveground Biomass	Modeled
Basal Area	Modeled
Mean Stem Diameter	Modeled
Vertical Foliar Profiles	Modeled
Canopy Volume	Modeled
Large Tree Density	Inferred
Canopy Cover, LAI	Fusion with other sensors
Life Form Diversity	Fusion with other sensors

Tableau 6.1. Contributions potentielles de la télédétection lidar pour applications forestières. Source (Dubayah and Drake, 2000).

6.2.3. Système mixte forêt-atmosphère

L'idée à l'origine de ma thèse était d'étudier, à partir de démonstrateurs instrumental et numérique, l'apport d'un système lidar pour la mesure du couvert forestier tout en conservant la possibilité d'effectuer des mesures pour l'étude des cycles des nuages, des aérosols atmosphériques et de l'eau. A cause de de moyens insuffisants pour la réalisation d'un système couplé forêt/atmosphère, nous n'avons conservé que les objectifs pour l'étude d'un lidar dédié à la mesure forestière à partir de l'espace. Néanmoins, des travaux ont été conduits en parallèle de cette thèse sur l'étude des aérosols et du cycle de l'eau (Chazette et al., 2014; Dieudonné et al., 2014) avec des lidar de conception instrumentale très proches.

Ce travail doit être poursuivi car la solution qui repose sur un système lidar mixte me semble être la plus profitable. Elle permettra de conserver et de compléter les grandes séries temporelles acquises grâce aux observations CALIOP de la mission CALIPSO. On disposera ainsi de jeux de données à caractère climatologique. La mission EARTHCARE est planifiée par l'ESA d'ici 2018 (http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Earth_Explorers/EarthCARE), mais devrait pouvoir inclure une dimension forêt. Il n'y a en effet aucune difficulté technologique particulière à une extension vers des produits forestiers.

Une prospective plus proche est celle envisagée dans le cadre du projet EU FP7 DACCIIWA. L'expérience associée aura lieu en 2015 sur l'Afrique de l'Ouest, au-dessus des forêts tropicales. L'un des principaux objectifs est l'étude du couplage entre la forêt et la composition chimique de l'atmosphérique. La mesure lidar sera utilisée ici pour identifier les structures forestières et atmosphériques.

Un système lidar spatial qui effectue des mesures sur la forêt et l'atmosphère est donc réalisable. Il devrait également apporter des informations topographiques, par exemple sur les glaces polaires, ou sur la surface des océans.

6.2.4. Assimilation des données lidar canopée

Il est nécessaire d'avoir un outil qui permette de généraliser l'observation lidar hors de la trace. En effet, les mesures lidar ne seront effectuées que selon la trace au sol du satellite, et elles ne couvriront pas de manière homogène les forêts. Les paramètres forestiers déduits de la mesure lidar sont des contraintes fortes pour la modélisation. Ils le sont d'autant plus s'ils sont couplés à des mesures de concentration de composés dans l'air, comme pour le cycle du carbone. Le LAI est un paramètre clé pour contraindre les échanges entre la forêt et l'atmosphère à partir des modèles. La hauteur des arbres, quant à elle, permet de contraindre la composante biomasse du modèle pour les projections climatiques car elle est directement liée à l'âge de la forêt (il faut également tenir compte des stressés et des quantités de nutriments dans le sol). En assimilant l'observation lidar via les précédents paramètres forestiers, les modèles prédiront plus précisément la vitesse de croissance de la végétation, et donc l'évolution dans le temps du stock de carbone forestier.

Pour des observations spatiales, l'assimilation des données lidar sera donc un atout important afin d'aider à la « généralisation » de la mesure. Une démonstration à partir de mesures aéroportées sur de grandes forêts tropicales et boréales sera nécessaire.

6.2.5. Un lien avec la dynamique et la ressource éolienne

On peut trouver d'autres applications de la mesure lidar sur les couverts forestiers. L'une d'actualité est liée aux ressources énergétiques éoliennes. Ces ressources sont fortement modulées et influencent leur environnement à plus ou moins grande échelle en fonction des conditions de rugosité. Un système lidar, comme l'instrument ULICE, permet d'obtenir les hauteurs d'arbre avec des résolutions horizontale et verticale suffisantes pour disposer de la rugosité géométrique. Cette même rugosité peut être directement liée à la rugosité aérodynamique via une paramétrisation adaptée qui reste encore à étudier. Nous avons en effet peu d'informations de ce type sur les forêts. Une telle paramétrisation sera une contrainte forte pour les modèles mésoéchelles aidant à la gestion de la ressource éolienne (Vautard et al., 2014). Une illustration est donnée sur la Figure 6.4.

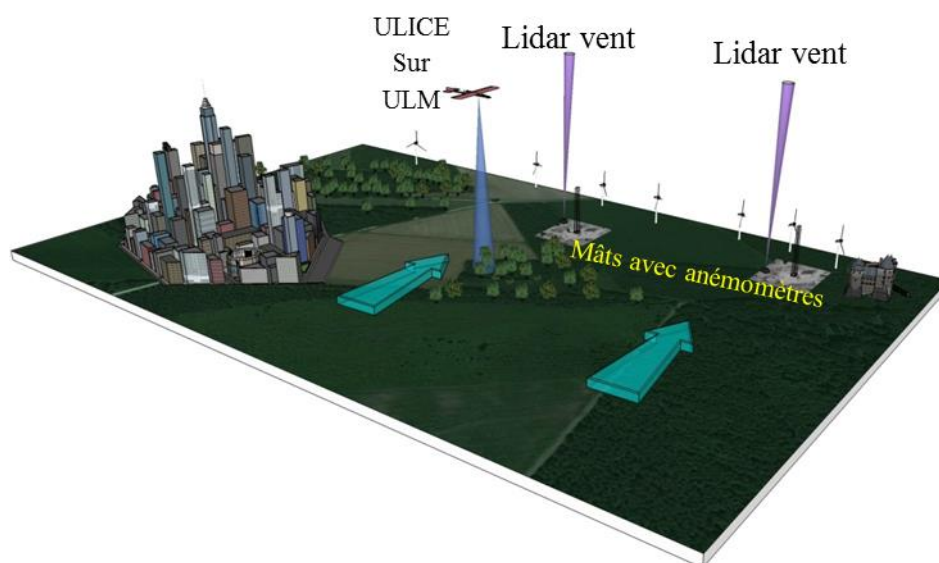


Figure 6.4. Illustration en 3 dimensions d'une expérience permettant de déduire la rugosité géométrique des forêts par lidar aéroporté et faire le lien avec la rugosité aérodynamique mesurée à partir de mâts équipés d'anémomètres et de systèmes lidar vent placés au niveau du sol.

BIBLIOGRAPHIE

Les références des articles sont après chaque article et ne sont pas incluses dans cette sections.

Ahmed, R., Siqueira, P. and Hensley, S.: A study of forest biomass estimates from lidar in the northern temperate forests of New England, *Remote Sens. Environ.*, 130, 121–135, doi:10.1016/j.rse.2012.11.015, 2013.

Allouis, T., Durrieu, S., Chazette, P., Bailly, J. S., Cuesta, J., Véga, C., Flamant, P. and Coutron, P.: Potential of an ultraviolet, medium-footprint lidar prototype for retrieving forest structure, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 66(6 SUPPL.), 2011.

Asner, G. P.: Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance, *Remote Sens. Environ.*, 64(3), 234–253, doi:10.1016/S0034-4257(98)00014-5, 1998.

Asner, G. P.: Tropical forest carbon assessment: integrating satellite and airborne mapping approaches, *Environ. Res. Lett.*, 4(3), 034009, 2009.

Asner, G. P. and Mascaro, J.: Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric, *Remote Sens. Environ.*, 140, 614–624, doi:10.1016/j.rse.2013.09.023, 2014.

Asner, G. P., Powell, G. V. N., Mascaro, J., Knapp, D. E., Clark, J. K., Jacobson, J., Kennedy-Bowdoin, T., Balaji, A., Paez-Acosta, G., Victoria, E., Secada, L., Valqui, M. and Hughes, R. F.: High-resolution forest carbon stocks and emissions in the Amazon., *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 107(38), 16738–42, doi:10.1073/pnas.1004875107, 2010.

Badeau, V., Dupouey, J. L. and Cluzeau, C.: Climate change and the biogeography of French tree species: first result and perspectives, in *Forests, carbon cycle and climate change*, pp. 231–252, c/o INRA, Versailles; France., 2010.

Badeau, V., Dupouey, J.-L., Cluzeau, C., Drapier, J. and Le Bas, C.: Modélisation et cartographie de l'aire climatique potentielle des grandes essences forestières françaises, *Rapp. Final du Proj. CARBOFOR–Séquestration carbone dans les Gd. écosystèmes For. Fr. Tâche D*, 1, 2004.

Ballhorn, U., Jubanski, J. and Siegert, F.: ICESat/GLAS Data as a Measurement Tool for Peatland Topography and Peat Swamp Forest Biomass in Kalimantan, Indonesia, *Remote Sens.*, 3(12), 1957–1982, doi:10.3390/rs3091957, 2011.

Balzter, H., Rowland, C. S. and Saich, P.: Forest canopy height and carbon estimation at Monks Wood National Nature Reserve, UK, using dual-wavelength SAR interferometry, *Remote Sens. Environ.*, 108(3), 224–239, 2007.

Bellassen, V., Delbart, N., Le Maire, G., Luyssaert, S., Ciais, P. and Viovy, N.: Potential knowledge gain in large-scale simulations of forest carbon fluxes from remotely sensed biomass and height, *For. Ecol. Manage.*, 261(3), 515–530, doi:10.1016/j.foreco.2010.11.002, 2011a.

Bellassen, V., le Maire, G., Guin, O., Dhôte, J. F., Ciais, P. and Viovy, N.: Modelling forest management within a global vegetation model—Part 2: Model validation from a tree to a continental scale, *Ecol. Modell.*, 222(1), 57–75, doi:10.1016/j.ecolmodel.2010.08.038, 2011b.

Berthier, S., Chazette, P., Couvert, P., Pelon, J., Dulac, F., Thieuleux, F., Moulin, C. and Pain, T.: Desert dust aerosol columnar properties over ocean and continental Africa from Lidar in-Space Technology Experiment (LITE) and Meteosat synergy, *J. Geophys. Res.*, 111(D21), D21202, doi:10.1029/2005JD006999, 2006.

Blair, J. B., Coyle, D. B., Bufton, J. L. and Harding, D. J.: Optimization of an airborne laser altimeter for remote sensing of vegetation and tree canopies, *Proc. IGARSS '94 - 1994 IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, 2, doi:10.1109/IGARSS.1994.399307, 1994.

Blair, J. B., Rabine, D. L. and Hofton, M. A.: The Laser Vegetation Imaging Sensor: A medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 54(2-3), 115–122, 1999.

Bolin, B. and Cook, R. B.: *The Major Biogeochemical Cycles and their Interactions*, John Wiley and Sons, New York., 1983.

Boudreau, J., Nelson, R. F., Margolis, H. A., Beaudoin, A., Guindon, L. and Kimes, D. S.: Regional aboveground forest biomass using airborne and spaceborne LiDAR in Québec, *Remote Sens. Environ.*, 112(10), 3876–3890, 2008.

Brenner, A. C., Zwally, H. J. and Bentley, C. R.: Derivation of range and range distributions from laser pulse waveform analysis for surface elevations, roughness, slope, and vegetation heights, *Geosci. Laser Altim. Syst. Algorithm Theor. Basis Doc.*, version 4., 93p, 2003.

Bufton, J. L.: Airborne lidar for profiling of surface topography, *Opt. Eng.*, 30(1), 72, doi:10.1117/12.55770, 1991.

Cadet, T. and Figier, J.: Réserve naturelle de Mare-Longue : étude floristique et écologique. [online] Available from: http://etic.univ-reunion.fr/theresien/docs/publications/16_Cadet Figier.pdf, 1989.

Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., Fölster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.-P., Nelson, B. W., Ogawa, H., Puig, H., Riéra, B. and Yamakura, T.: Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests., *Oecologia*, 145(1), 87–99, doi:10.1007/s00442-005-0100-x, 2005.

Chazette, P.: Etude complémentaire des systèmes de télédétection laser et des sondeurs passifs pour la détermination des paramètres météorologiques à partir de plates-formes spatiales, Thèse de doctorat de l'Université Paris 7., 1990.

Chazette, P., Bocquet, M., Royer, P., Winiarek, V., Raut, J.-C., Labazuy, P., Gouhier, M., Lardier, M. and Cariou, J.-P.: Eyjafjallajökull ash concentrations derived from both lidar and modeling, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 117(D20), n/a–n/a, doi:10.1029/2011JD015755, 2012.

Chazette, P., Couvert, P., Randriamiarisoa, H., Sanak, J., Bonsang, B., Moral, P., Berthier, S., Salanave, S. and Toussaint, F.: Three-dimensional survey of pollution during winter in French Alps valleys, *Atmos. Environ.*, 39(6), 1035–1047, 2005.

Chazette, P., Marnas, F., Totems, J. and Shang, X.: Comparison of IASI water vapor retrieval with H₂O-Raman lidar in the framework of the Mediterranean HyMeX and ChArMEx programs, *Atmos. Chem. Phys.*, 14(18), 9583–9596, doi:10.5194/acp-14-9583-2014, 2014.

Chazette, P., Pelon, J. and Mégie, G.: Determination by spaceborne backscatter lidar of the structural parameters of atmospheric scattering layers., *Appl. Opt.*, 40(21), 3428–40, 2001.

Chazette, P., Sanak, J. and Dulac, F.: New approach for aerosol profiling with a lidar onboard an ultralight aircraft: application to the African Monsoon Multidisciplinary Analysis., *Environ. Sci. Technol.*, 41(24), 8335–8341, doi:10.1021/es070343y, 2007.

Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Quéré, C. Le, Myneni, R. B., Piao, S. and Thornton, P.: Carbon and Other Biogeochemical Cycles, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 465–570, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2013.

Core Writing Team, Pachauri, R. K. and Reisinger, A.: *Climate Change 2007: Synthesis Report*, Geneva, Switzerland., 2007.

Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M. C., Frame, D., Mahowald, N. and Winther, J.-G.: Introduction, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 119–158, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2013.

Cuesta, J., Chazette, P., Allouis, T., Flamant, P. H., Durrieu, S., Sanak, J., Genau, P., Guyon, D., Loustau, D. and Flamant, C.: Observing the Forest Canopy with a New Ultra-Violet Compact Airborne Lidar, *Sensors*, 10(8), 7386–7403, doi:10.3390/s100807386, 2010.

Déqué, M., Drevet, C., Braun, A. and Cariolle, D.: The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling, *Clim. Dyn.*, 10(4-5), doi:10.1007/BF00208992, 1994.

Dieudonné, E., Chazette, P., Marnas, F., Totems, J. and Shang, X.: Lidar profiling of aerosol optical properties from Paris to Lake Baikal (Siberia), *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2014.

Dinh, H. T. M., Le Toan, T., Rocca, F., Tebaldini, S., D'Alessandro, M. M. and Villard, L.: Relating P-Band Synthetic Aperture Radar Tomography to Tropical Forest Biomass, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 52(2), 967–979, doi:10.1109/TGRS.2013.2246170, 2014.

Drake, J. B., Dubayah, R. O., Clark, D. B., Knox, R. G., Blair, J. B., Hofton, M. A., Chazdon, R. L., Weishampel, J. F. and Prince, S.: Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar, *Remote Sens. Environ.*, 79(2-3), 305–319, doi:10.1016/S0034-4257(01)00281-4, 2002a.

Drake, J. B., Dubayah, R. O., Knox, R. G., Clark, D. B. and Blair, J. B.: Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest, *Remote Sens. Environ.*, 81(2-3), 378–392, 2002b.

Dubayah, R. O. and Drake, J. B.: Lidar remote sensing for forestry, *J. For.*, 98(6), 44–46, 2000.

Dubayah, R. O., Sheldon, S. L., Clark, D. B., Hofton, M. A., Blair, J. B., Hurtt, G. C. and Chazdon, R. L.: Estimation of tropical forest height and biomass dynamics using lidar remote sensing at La Selva, Costa Rica, *J. Geophys. Res.*, 115, doi:10.1029/2009JG000933, 2010.

- Dufrêne, E., Davi, H., François, C., Maire, G. le, Dantec, V. Le and Granier, A.: Modelling carbon and water cycles in a beech forest, *Ecol. Modell.*, 185(2-4), 407–436, doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.01.004, 2005.
- Dupouey, J. L., Pignard, G., Badeau, V., Thimonier, A., Dhôte, J. F., Nepveu, G., Bergès, L., Augusto, L., Belkacem, S. and Nys, C.: Stocks et flux de carbone dans les forêts françaises, *Comptes rendus l'Académie d'Agriculture Fr.*, 85(6), 293–310, 1999.
- Dupouey, J. L., Pignard, G. and Hamza, N.: Estimating carbon stocks and fluxes in forest biomass: 2. Application to the French case based upon National Forest Inventory Data, in *Forests, carbon cycle and climate change*, pp. 101–129, c/o INRA, Versailles; France., 2010.
- Garestier, F., Dubois-Fernandez, P. C. and Champion, I.: Forest Height Inversion Using High-Resolution P-Band Pol-InSAR Data, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 46(11), doi:10.1109/TGRS.2008.922032, 2008.
- Garvin, J., Bufton, J., Blair, J., Harding, D., Luthcke, S., Frawley, J. and Rowlands, D.: Observations of the earth's topography from the Shuttle Laser Altimeter (SLA): Laser-pulse echo-recovery measurements of terrestrial surfaces, *Phys. Chem. Earth*, 23(9-10), 1053–1068, 1998.
- Goward, S. N. and Williams, D. L.: Landsat and Earth Systems Science : Development of terrestrial monitoring, *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 63(7), 887–900, 1997.
- Guenther, G. and Mesick, H.: Analysis of airborne lidar bathymetric waveforms, in *Proc. of the 9th Ocean Optics*, pp. 232–241, SPIE, Orlando, FA, USA., 1988.
- Harding, D. J. and Carabajal, C. C.: ICESat waveform measurements of within-footprint topographic relief and vegetation vertical structure, *Geophys. Res. Lett.*, 32(21), doi:10.1029/2005GL023471, 2005.
- Hartmann, D. J., Klein Tank, A. M. G., Rusticucci, M., Alexander, L. V., Brönnimann, S., Charabi, Y. A.-R., Dentener, F. J., Dlugokencky, E. J., Easterling, D. R., Kaplan, A., Soden, B. J., Thorne, P. W., Wild, M. and Zhai, P.: Observations: Atmosphere and Surface, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 159–254, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2013.
- Hayashi, M., Saigusa, N., Oguma, H. and Yamagata, Y.: Forest canopy height estimation using ICESat/GLAS data and error factor analysis in Hokkaido, Japan, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 81, 12–18, 2013.
- Höfle, B., Hollaus, M. and Hagenauer, J.: Urban vegetation detection using radiometrically calibrated small-footprint full-waveform airborne LiDAR data, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 67(1), 134–147, 2012.
- Hofton, M. ., Rocchio, L. ., Blair, J. . and Dubayah, R.: Validation of Vegetation Canopy Lidar sub-canopy topography measurements for a dense tropical forest, *J. Geodyn.*, 34(3-4), 491–502, doi:10.1016/S0264-3707(02)00046-7, 2002.
- Hofton, M. a., Minster, J. B. and Blair, J. B.: Decomposition of laser altimeter waveforms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 38(4), 1989–1996, doi:10.1109/36.851780, 2000.

Huete, A., Justice, C. and Leeuwen, W. van: MODIS VEGETATION INDEX (MOD 13) ALGORITHM THEORETICAL BASIS., 1999.

IPCC: Climate change 2007: the physical science basis, edited by Array, Intergov. Panel Clim. Chang., doi:10.1038/446727a, 2007.

IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Intergov. Panel Clim. Chang., 2013.

Kaula, W. M., Schubert, G., Lingenfelter, R. E., Sjogren, W. L. and Wollenhaupt, W. R.: Apollo laser altimetry and inferences as to lunar structure, 1974.

Knyazikhin, Y., Glassy, J., Privette, J. L., Tian, Y., Lotsch, A., Zhang, Y., Wang, Y., Morisette, J. T., P.Votava, Myneni, R. B., Nemani, R. R. and Running, S. W.: MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15) Algorithm Theoretical Basis Document., 1999.

Krabill, W. B. and Collins, J. G.: Airborne laser topographic mapping results, Photogramm. Eng. Remote Sens., 50(6), 685–694, 1984.

Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S. and Prentice, I. C.: A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, Global Biogeochem. Cycles, 19(1), n/a–n/a, doi:10.1029/2003GB002199, 2005.

Kumar, K. K., Hoerling, M. and Rajagopalan, B.: Advancing dynamical prediction of Indian monsoon rainfall, Geophys. Res. Lett., 32(8), 1–4, 2005.

Lawson, C. L. and Hanson, R. J.: Solving Least Squares Problems (Classics in Applied Mathematics), Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ., 1974.

Lefsky, M. A. and Cohen, W. B.: Lidar remote sensing of above-ground biomass in three biomes, Glob. Ecol. Biogeogr., 11(5), 393–399, 2002.

Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Acker, S. A., Parker, G. G., Spies, T. A. and Harding, D.: Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-fir western hemlock forests, Remote Sens. Environ., 70(3), 339–361, 1999a.

Lefsky, M. A., Harding, D., Cohen, W. B., Parker, G. and Shugart, H. H.: Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of eastern Maryland, USA, Remote Sens. Environ., 67(1), 83–98, 1999b.

Lefsky, M. A., Harding, D. J., Keller, M., Cohen, W. B., Carabajal, C. C., Del Bom Espirito-Santo, F., Hunter, M. O. and de Oliveira, R.: Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat, Geophys. Res. Lett., 32(22), L22S02, doi:10.1029/2005GL023971, 2005.

Léon, J.-F., Chazette, patrick, Pelon, J., Dulac, F. and Randriamiarisoa, H.: Aerosol direct radiative impact over the INDOEX area based on passive and active remote sensing, J. Geophys. Res., 107(D19), 8006, doi:10.1029/2000JD000116, 2002.

Li, Z., Strahler, A., Schaaf, C., Howe, G., Martel, J., Hewawasam, K., Douglas, E., Chakrabarti, S., Cook, T., Paynter, I., Saenz, E. J., Wang, Z., Yang, X., Woodcock, C. E., Jupp, D. L. B., Schaefer, M., Culvenor, D. S. and Newnham, G. J. J. L. L.: Effective area indexes and angle distributions of leafy

and woody components of forests from dual-wavelength terrestrial lidar scanning data, in IGARSS 2014., 2014.

Lim, K., Treitz, P., Baldwin, K., Morrison, I. and Green, J.: Lidar remote sensing of biophysical properties of tolerant northern hardwood forests, *Can. J. Remote Sens.*, 29(5), 658–678, doi:10.5589/m03-025, 2003.

Marquardt, D. W.: An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters, *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, 11(2), 431–441, doi:10.1137/0111030, 1963.

Martin, J. H.: Glacial-interglacial CO₂ change: The Iron Hypothesis, *Paleoceanography*, 5(1), 1–13, doi:10.1029/PA005i001p00001, 1990.

Means, J. E., Acker, S. A., Fitt, B. J., Renslow, M., Emerson, L. and Hendrix, C. J.: Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 66(11), 1367–1371, 2000.

Means, J. E., Acker, S. A., Harding, D. J., Blair, J. B., Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Harmon, M. E. and McKee, W. A.: Use of large-footprint scanning airborne Lidar to estimate forest stand characteristics in the western cascades of Oregon, *Remote Sens. Environ.*, 67(3), 298–308, 1999.

Measures, R. M.: *Laser remote sensing: fundamentals and applications*, edited by J. Wiley, Krieger publishing company., 1984.

Menne, M. J., Durre, I., Vose, R. S., Gleason, B. E. and Houston, T. G.: An Overview of the Global Historical Climatology Network-Daily Database, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 29(7), 897–910, doi:10.1175/JTECH-D-11-00103.1, 2012.

Mikami, M.: Measurement of saltation process over gobi and sand dunes in the Taklimakan desert, China, with newly developed sand particle counter, *J. Geophys. Res.*, 110(D18), D18S02, doi:10.1029/2004JD004688, 2005.

Nelson, R.: Modeling forest canopy heights: The effects of canopy shape, *Remote Sens. Environ.*, 60(3), 327–334, doi:10.1016/S0034-4257(96)00214-3, 1997.

Nelson, R., Krabill, W. and Tonelli, J.: Estimating forest biomass and volume using airborne laser data, *Remote Sens. Environ.*, 24(2), 247–267, doi:10.1016/0034-4257(88)90028-4, 1988.

Nelson, R., Parker, G. and Hom, M.: A Portable Airborne Laser System for Forest Inventory, *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 69(3), 267–273, 2003.

O'Dowd, C. D. and Smith, M. H.: Physicochemical properties of aerosols over the northeast Atlantic: Evidence for wind-speed-related submicron sea-salt aerosol production, *J. Geophys. Res.*, 98(D1), 1137, doi:10.1029/92JD02302, 1993.

Pignard, G., Hamza, N. and Dupouey, J. L.: Estimating carbon stocks and fluxes in French forest biomass, based on national inventory data, in *Final Report of the Carbofor Project.*, 2006.

Porté, A.: *Modélisation des effets du bilan hydrique sur la production primaire et la croissance d'un couvert de Pin maritime (Pinus pinaster Ait) en Lande Humide*, 197 pp., Université de Paris-Sud, U.F..R. Scientifique d'Orsay., 1999.

- Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T. and Rosenfeld, D.: Aerosols, climate, and the hydrological cycle., *Science*, 294(5549), 2119–24, doi:10.1126/science.1064034, 2001a.
- Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Lelieveld, J., Mitra, A. P., Althausen, D., Anderson, J., Andreae, M. O., Cantrell, W., Cass, G. R., Chung, C. E., Clarke, A. D., Coakley, J. A., Collins, W. D., Conant, W. C., Dulac, F., Heintzenberg, J., Heymsfield, A. J., Holben, B., Howell, S., Hudson, J., Jayaraman, A., Kiehl, J. T., Krishnamurti, T. N., Lubin, D., McFarquhar, G., Novakov, T., Ogren, J. A., Podgorny, I. A., Prather, K., Priestley, K., Prospero, J. M., Quinn, P. K., Rajeev, K., Rasch, P., Rupert, S., Sadourny, R., Satheesh, S. K., Shaw, G. E., Sheridan, P. and Valero, F. P. J.: Indian Ocean Experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 106(D22), 28371–28398, doi:10.1029/2001JD900133, 2001b.
- Randriamiarisoa, H., Chazette, P. and Megie, G.: Retrieving the aerosol single-scattering albedo from the NO₂ photolysis rate coefficient, *Tellus B*, 56(2), doi:10.3402/tellusb.v56i2.16408, 2004.
- Rasch, P. J., Collins, W. D. and Eaton, B. E.: Understanding the Indian Ocean Experiment (INDOEX) aerosol distributions with an aerosol assimilation, *J. Geophys. Res.*, 106(D7), 7337, doi:10.1029/2000JD900508, 2001.
- Rhein, M., Rintoul, S. R., Aoki, S., Campos, E., Chambers, D., Feely, R. A., Gulev, S., Johnson, G. C., Josey, S. A., Kostianoy, A., Mauritzen, C., Roemmich, D., Talley, L. D. and Wang, F.: Observations: Ocean, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 255–316, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2013.
- Rosette, J. A. B., North, P. R. J. and Suárez, J. C.: Vegetation height estimates for a mixed temperate forest using satellite laser altimetry, *Int. J. Remote Sens.*, 29(5), 1475–1493, doi:10.1080/01431160701736380, 2008.
- Royer, P., Chazette, P., Sartelet, K., Zhang, Q. J., Beekmann, M. and Raut, J. C.: Comparison of lidar-derived PM₁₀ with regional modeling and ground-based observations in the frame of MEGAPOLI experiment, *Atmos. Chem. Phys.*, 11(20), 10705–10726, 2011.
- Saint-André, L., Vallet, P., Pignard, G., Dupouey, J. L., Colin, A., Loustau, D., Le Bas, C., Meredieu, C., Caraglio, Y., Porté, A., Hamza, N., Cazin, A., Nouvellon, Y. and Dhôte, J. F.: Estimating carbon stocks in forest stands: 1. Methodological developments, in *Forests, Carbon Cycle and Climate Change*, pp. 79–100, CIRAD, Versailles; France., 2010.
- Schreier, H., LOUGHEED, J., TUCKER, C. and LECKIE, D.: Automated measurements of terrain reflection and height variations using an airborne infrared laser system, *Int. J. Remote Sens.*, 6(1), 101–113, doi:10.1080/01431168508948427, 1985.
- Schutz, B. E., Zwally, H. J., Shuman, C. A., Hancock, D. and DiMarzio, J. P.: Overview of the ICESat Mission, *Geophys. Res. Lett.*, 32(21), doi:10.1029/2005GL024009, 2005.
- Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N.: *Atmospheric Chemistry and Physics*, John Wiley & Sons, Inc., New York., 1998.
- Shaiek, O., Loustau, D., Trichet, P., Meredieu, C., Bachtobji, B., Garchi, S. and EL Aouni, M. H.: Generalized biomass equations for the main aboveground biomass components of maritime pine across contrasting environments, *Ann. For. Sci.*, 68(3), 443–452, doi:10.1007/s13595-011-0044-8, 2011.

- Shang, X. and Chazette, P.: Interest of a Full-Waveform Flown UV Lidar to Derive Forest Vertical Structures and Aboveground Carbon, *Forests*, 5(6), 1454–1480, 2014.
- Shang, X. and Chazette, P.: End-to-End Simulation for a Forest-Dedicated Full-Waveform Lidar onboard a Satellite Initialized from UV Airborne Lidar Experiments, *Submitt. to Remote Sens.*, 2015.
- Shang, X., Chazette, P., Totems, J., Dieudonné, E., Hamonou, E., Duflot, V., Strasberg, D., Flores, O., Fournel, J. and Tulet, P.: Tropical forests of Reunion Island observed from airborne lidar, *Submitt. to Remote Sens. Environ.*, 2014.
- Smith, D. E.: Topography of the Northern Hemisphere of Mars from the Mars Orbiter Laser Altimeter, *Science* (80-.), 279(5357), 1686–1692, doi:10.1126/science.279.5357.1686, 1998.
- Smullin, L. D. and Fiocco, G.: Optical Echoes from the Moon, *Nature*, 194(4835), 1267–1267, doi:10.1038/1941267a0, 1962.
- Souza, C. M., Roberts, D. A. and Cochrane, M. A.: Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires, *Remote Sens. Environ.*, 98(2-3), 329–343, doi:10.1016/j.rse.2005.07.013, 2005.
- Stein, T. H. M., Delanoë, J. and Hogan, R. J.: A Comparison among Four Different Retrieval Methods for Ice-Cloud Properties Using Data from CloudSat , CALIPSO , and MODIS, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 50(9), 1952–1969, doi:10.1175/2011JAMC2646.1, 2011.
- Tang, H., Dubayah, R., Swatantran, A., Hofton, M., Sheldon, S., Clark, D. B. and Blair, B.: Retrieval of vertical LAI profiles over tropical rain forests using waveform lidar at La Selva, Costa Rica, *Remote Sens. Environ.*, 124, 242–250, doi:10.1016/j.rse.2012.05.005, 2012.
- Ter-Mikaelian, M. T. and Korzukhin, M. D.: Biomass equations for sixty-five North American tree species, *For. Ecol. Manage.*, 97(1), 1–24, doi:10.1016/S0378-1127(97)00019-4, 1997.
- Le Toan, T., Quegan, S., Davidson, M. W. J., Balzter, H., Paillou, P., Papathanassiou, K., Plummer, S., Rocca, F., Saatchi, S., Shugart, H. and Ulander, L.: The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle, *Remote Sens. Environ.*, 115(11), 2850–2860, 2011.
- Le Toan, T., Quegan, S., Woodward, I., Lomas, M., Delbart, N. and Picard, G.: Relating Radar Remote Sensing of Biomass to Modelling of Forest Carbon Budgets, *Clim. Change*, 67(2-3), 379–402, doi:10.1007/s10584-004-3155-5, 2004.
- Vautard, R., Thais, F., Tobin, I., Bréon, F.-M., Devezeaux de Lavergne, J.-G., Colette, A., Yiou, P. and Ruti, P. M.: Regional climate model simulations indicate limited climatic impacts by operational and planned European wind farms., *Nat. Commun.*, 5, 3196, doi:10.1038/ncomms4196, 2014.
- Wang, G. H., Zhou, B. H., Cheng, C. L., Cao, J. J., Li, J. J., Meng, J. J., Tao, J., Zhang, R. J. and Fu, P. Q.: Impact of Gobi desert dust on aerosol chemistry of Xi'an, inland China during spring 2009: differences in composition and size distribution between the urban ground surface and the mountain atmosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 13(2), 819–835, doi:10.5194/acp-13-819-2013, 2013a.
- Wang, Y., Sartelet, K. N., Bocquet, M. and Chazette, P.: Assimilation of ground versus lidar observations for PM10 forecasting, *Atmos. Chem. Phys.*, 13(1), 269–283, doi:10.5194/acp-13-269-2013, 2013b.

Whitby, K. . and Cantrell, B.: Fine particles, in International Conference on Environmental sensing and assessment, Institute of Electrical and Electronic Engineers, Las Vegas, NV., 1976.

William C. Hinds: Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, 2nd Editio., John Wiley & Sons., 1999.

Wu, W.: The Generalized Difference Vegetation Index (GDVI) for Dryland Characterization, Remote Sens., 6(2), 1211–1233, doi:10.3390/rs6021211, 2014.

Zianis, D., Muukkonen, P., Mäkipää, R. and Mencuccini, M.: Biomass and stem volume equations for tree species in Europe, SILVA Fenn., 4, 2–63, 2005.

Zolkos, S. G., Goetz, S. J. and Dubayah, R.: A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing, Remote Sens. Environ., 128, 289–298, doi:10.1016/j.rse.2012.10.017, 2013.

ANNEXE A – PROFIL SCIENTIFIQUE

Mon travail de thèse a fait l'objet de différentes valorisations en complément des articles à comité de lecture. Cette annexe présente la liste de ces valorisations et met l'accent sur ma contribution expérimentale, même dans des domaines différents de ceux de la forêt.

A.1. Liste des publications

Articles dans des revues avec comité de lecture

- X. Shang** and P. Chazette, 2014. Interest of a Full-Waveform Flown UV Lidar to Derive Forest Vertical Structures and Aboveground Carbon. *Forests*, 5, 1545-1480.
- X. Shang** and P. Chazette, 2015. End-to-End Simulation for a Forest-Dedicated Full-Waveform Lidar Onboard a Satellite Initialized from Airborne Ultraviolet Lidar Experiments. *Remote Sensing*, 7, 5222-5255.
- X. Shang**, P. Chazette, J. Totems, E. Dieudonné, E. Hamonou, V. Duflot, D. Strasberg, O. Flores, J. Fournel, and P. Tulet, 2015. Tropical forests of Reunion Island observed by airborne lidar. Submitted to *Remote Sensing of Environment*, 2015.
- X. Shang**, M. de Luca, G. Pettinari, G. Bisognin, L. Amidani, E. Fonda, F. Boscherini, M. Berti and G. Ciatto, 2014. Quantitative determination of In clustering in In-rich $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ thin films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 47(41), 415301. doi:10.1088/0022-3727/47/41/415301
- P. Chazette, F. Marnas, J. Totems, and **X. Shang**, 2014. Comparison of IASI water vapor retrieval with H_2O -Raman lidar in the frame of the Mediterranean HyMeX and ChArMEx programs. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(18), 9583–9596. doi:10.5194/acp-14-9583-2014
- E. Dieudonné, P. Chazette, F. Marnas, J. Totems and **X. Shang**, 2014. Lidar profiling of aerosol optical properties from Paris to Lake Baikal (Siberia). ACPD.

Articles dans des actes de colloque (proceedings)

- Shang Xiaoxia** and Chazette Patrick. An UV full-waveform airborne lidar as a demonstrator for future spaceborne missions dedicated to forest, *IGRASS* 2014.

A.2. Liste des Communications

CONFERENCE

Présentation Orale

- X. Shang**, P. Chazette, C. Flamant, F. Marnas, A. Doerenbecher, J. Totems, V. Ducrocq, and F. Duffourg, Tropical moisture plumes from West Africa and their link to intense rainfall over Spain and southern France: a case study from the HyMeX SOP1, 8th HyMeX Workshop, 2014, Malta.
- X. Shang**, P. Chazette, An uv full-waveform airborne lidar as a demonstrator for future spaceborne missions dedicated to forest, IGARSS 2014, Québec.
- X. Shang**, P. Chazette, Multiple-scattering effects on spaceborne lidar dedicated to forests survey, EGU 2014, Vienne.
- X. Shang**, P. Chazette, J. Sanak, E. Dufrêne, and K. Soudani, *Forest biomass as retrieved from airborne LiDAR above the Barbeau forest*, RCSY 2013 (co-organisée par l'ESA), Cyprus.
- X. Shang**, P. Chazette, K. Soudani, and E. Dufrêne, *LiDAR sampling study over the Barbeau / Fontainebleau forest*, EGU 2012, Vienne.
- J. Totems, M. Sicard, S. Bertolín, M.-L. Boytard, P. Chazette, A. Comerón, F. Dulac, S. Hassanzadeh, D. Lange, F. Marnas, C. Muñoz, **X. Shang**, *In-situ, sunphotometer and Raman lidar observations of aerosol transport events in the western Mediterranean during the June 2013 ChArMEx campaign*, EGU 2014, Vienne.

Poster

- X. Shang**, P. Chazette, J. Totems, F. Marnas and J. Sanak, *Forest Structures Retrieval From Lidar Onboard ULA*, EGU 2013, Vienne.
- P. Chazette, **X. Shang**, J. Totems, F. Marnas and J. Sanak, *New Mobile Lidar Systems Aboard ULTRA-LIGHT AIRCRAFT*, EGU 2013, Vienne.
- Boytard M.-L., Royer P., Chazette P., **Shang X.**, Marnas F., and Totems J., *Intercomparison Of Aerosol Optical Parameters From WALI And R-MAN₅₁₀ Aerosol Raman Lidars In The Framework Of Hymex Campaign*, EGU 2013, Vienne.

SÉMINAIRE

- Xiaoxia Shang**, Lidar applications: from the atmosphere to the forest, Met Office, Royaume-Uni, mars 2014.
- Xiaoxia Shang**, Lidar applications in LSCE, Université d'Athènes, Grèce, mars 2013.

A.3. Campagnes de mesures

J'ai effectué de nombreuses campagnes de mesure durant ma thèse. Elles étaient orientées vers mon sujet prioritaire qu'est l'étude des forêts par lidar, mais également sur des sujets de l'équipe lidar au sein de laquelle j'ai effectué mes travaux de recherche. Les campagnes de mesures auxquelles j'ai participé durant ma thèse sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Période		Durée de la campagne	Objectifs scientifiques
2012	Mai	3 semaines	Projet ANR CANOPEE, expérience au-dessus de l'Observatoire de Haute Provence (OHP). Etude de la structure verticale des chênes blancs pour l'estimation de leurs émissions de composés minoritaires (via la modélisation à partir d'un modèle de chimie-transport).
	Juin	1 semaine	Préparation de la mission Léman-Baïkal avec les systèmes lidar aéroportés ALIAS (Airborne Lidar for Atmospheric Studies) et LASURS (Lidar for Atmospheric Studies Using a Raman System). L'objectif était une documentation inédite des aérosols sur la traversée de Paris au lac Baïkal (Dieudonné et al., 2014).
	Juin	3 semaines	Expérience avec le lidar aéroporté ULICE pour l'étude de la forêt de Fontainebleau (Shang and Chazette, 2014).
	Sep-oct	5 semaines	Participation à l'expérience Hymex avec le lidar météorologique WALI (Water vapor and Aerosol Lidar). Etude du cycle de l'eau et des situations conduisant aux événements de pluie intense sur le bassin méditerranéen Ouest (Chazette et al., 2014).
	Oct	1 semaine	Expérience pour des tests de lidar aéroportés pour le projet Léman-Baïkal.
2013	Sep-oct	2 semaines	Repérage des sites forestiers de la Réunion. Mission en Forêt pour les relevés de terrain.
2014	Mai	2 semaines	Expérience sur les forêts tropicales de la Réunion et les aérosols atmosphériques comme traceurs de la dynamique sur les reliefs du piton Maïdo. Projet DELICE soutenu par le CNES et le CEA pour l'étude des forêts tropicales réunionnaises et la démonstration de faisabilité des mesures lidar ULICE sur des forêts de différentes densités (Shang et al., 2014).

A.4. CV

FORMATION

2011 – 31/12/2014	Thèse , LSCE/CEA, CNES-DGA, sous la direction de M. Patrick CHAZETTE, Gif-sur-Yvette, France Sujet : « Etude de la canopée forestière : De la mesure lidar aéroporté à l'observation spatiale ».
2010 – 2011	Diplôme de Master (2011) , Institut d'Optique <i>Graduate School</i> (SupOptique), France Spécialité "Optique, Matière, Plasmas".
2008 – 2011	Diplôme d'Ingénieur (2011) , Polytech'Paris-Sud (ex-IFIPS) (ex- NFIO), France Département d'Optronique.
2005 – 2008	Bachelor d'Optronique (2009) , Huazhong Université de Science & Technique, Chine Spécialité Optoélectronique.

EXPERIENCE

2011 (5 mois)	Stage de Master 2, Thales , sous la responsabilité de M. Patrick FENEYROU, Palaiseau, France. Sujet : « Validation expérimentale du concept LIDAR RADAR ».
2010 (4 mois)	Stage d'assistant ingénieur, Soleil Synchrotron , Gif-sur-Yvette, France. Sujet : « Modélisation de structures de semiconducteurs pour l'analyse de données de rayons X ».
2008– 2009 (4 mois)	Stage, Laboratoire Aimé Cotton, CNRS, Paris Sujet : « Mesure et prédiction de la profondeur de champ subjective ».
2008 (1 mois)	Stage, Laboratoire du Centre National de LASER de Chine, Wuhan, Chine. Recherche sur les performances d'un laser, manipulation du laser, couplage du laser.

LANGUES

Français : courant	Anglais : courant	Chinois : Langue maternelle
--------------------	-------------------	-----------------------------

DIVERS

Loisir :	Yoga, Maîtrise du Gu Zheng (instrument classique chinois), Piano, Badminton, Dance
Autre :	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Mon travail de thèse a été primé lors des JC2 du CNES le 08/10/2013.</i> • <i>Détentrice de La Bourse Nationale (la meilleure bourse en Chine pour les étudiants, chaque année moins de cinq étudiants pour chaque département peuvent l'obtenir), 2008.</i> • <i>Obtention du titre « le plus éminent étudiant » (Chaque année dans notre université, seul un étudiant sur 1500 peut l'obtenir), 2007-2008.</i>

ANNEXE B – AUTRES VALORISATIONS

B.1. Abstract de l'article de Chazette et al., ACP, 2014

Comparison of IASI water vapor retrieval with H₂O-Raman lidar in the framework of the Mediterranean HyMeX and ChArMEx programs

P. Chazette, F. Marnas, J. Totems, and X. Shang

The Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) is a new generation spaceborne passive sensor mainly dedicated to meteorological applications. Operational Level-2 products have been available via the European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) for several years. In particular, vertical profiles of water vapor measurements are retrieved from infrared radiances at the global scale. Nevertheless, the robustness of such products has to be checked because only a few validations have been reported. For this purpose, the field experiments that were held during the HyMeX and ChArMEx international programs are a very good opportunity. A H₂O-Raman lidar was deployed on the Balearic island of Menorca and operated continuously for ~ 6 and ~ 3 weeks during fall 2012 (Hydrological cycle in the Mediterranean eXperiment – HyMeX) and summer 2013 (Chemistry–Aerosol Mediterranean Experiment – ChArMEx), respectively. It measured simultaneously the water vapor mixing ratio and aerosol optical properties. This article does not aim to describe the IASI operational H₂O inversion algorithm, but to compare the vertical profiles derived from IASI onboard (meteorological operational) MetOp-A and the ground-based lidar measurements to assess the reliability of the IASI operational product for the water vapor retrieval in both the lower and middle troposphere. The links between water vapor contents and both the aerosol vertical profiles and the air mass origins are also studied. About 30 simultaneous observations, performed during nighttime in cloud free conditions, have been considered. For altitudes ranging from 2 to 7 km, root mean square errors (correlation) of $\sim 0.5 \text{ g kg}^{-1}$ (~ 0.77) and $\sim 1.1 \text{ g kg}^{-1}$ (~ 0.72) are derived between the operational IASI product and the available lidar profiles during HyMeX and ChArMEx, respectively. The values of both root mean square error and correlation are meaningful and show that the operational Level-2 product of the IASI-derived vertical water vapor mixing ratio can be considered for meteorological and climatic applications, at least in the framework of field campaigns.

B.2. Abstract de l'article de Dieudonné et al., ACPD, 2014

Lidar profiling of aerosol optical properties from Paris to Lake Baikal (Siberia)

E. Dieudonné, P. Chazette, F. Marnas, J. Totems and X. Shang

In June 2013, a ground-based mobile lidar performed the 10,000 km ride from Paris to Ulan-Ude, near Lake Baikal, profiling for the first time aerosol optical properties all the way from Western Europe to central Siberia. The instrument was equipped with N₂-Raman and depolarization channels that enabled an optical speciation of aerosols in the low and middle troposphere. The backscatter-to-extinction ratio (BER) and particle depolarization ratio (PDR) at 355 nm have been retrieved. The BER in the lower boundary layer (300-700 m) was found to be $0.017 \pm 0.009 \text{ sr}^{-1}$ in average during the campaign, with slightly higher values in background conditions near Lake Baikal ($0.021 \pm 0.010 \text{ sr}^{-1}$ in average) corresponding to dust-like particles. PDR values observed in Russian cities ($>1.7 \%$) are higher than the ones measured in European cities ($<1.3 \%$) due to the lifting of terrigenous aerosols by traffic on roads with a bad tarmac. Biomass burning layers from grassland or/and forest fires in southern Russia exhibit BER values ranging from 0.010 to 0.015 sr^{-1} and from 2 to 3 % for the PDR. Desert dust aerosols originating from the Caspian and Aral seas regions were characterized for the first time, with a BER (PDR) of 0.022 sr^{-1} (21 %) for pure dust, and 0.011 sr^{-1} (15 %) for a mix between dust and biomass burning. The lidar observations also showed that this dust event extended over 2300 km and lasted for ~ 6 days. Measurements from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) show that our results are comparable in terms of aerosol optical thickness (between 0.05 and 0.40 at 355 nm) with the mean aerosol load encountered throughout our route.